L'ONDE ÉLECTRIQUE

Revue Mensuelle publiée par la Société des Radioélectriciens

ABONNEMENT D'UN AN
FRANCE. . . . 800 »
ÉTRANGER : . . . 950 »

Etienne CHIRON
ÉDITEUR
40, Rue de Seine — PARIS (6°)
C. C. P. PARIS 53-35

Prix du Numéro :
80 francs

Vol. XXVII — Février 1947 — Numéro 239

SOMMAIRE

Etienne Chiron	R. MESNY.	41
Calcul des constantes équivalentes d'une lame de quartz vibrant en cisaillement plan	G. DUMESNIL.	42
Les éruptions de la chromosphère solaire	R. BUREAU.	45
Les récentes théories de l'antenne (*suite*)	E. ROUBINE.	57
L'œuvre radioélectrique de J. Béthenod	L. BOUTHILLON.	65
Nikola Tesla	F. BEDEAU.	75
Analyses		1 A à 8 A.

Sur la couverture :

Enregistrement du niveau moyen des atmosphériques au Laboratoire National de Radioélectricité

SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS

FONDATEURS

† Général FERRIÉ, Membre de l'Institut.

† H. ABRAHAM, Professeur à la Sorbonne.
† A. BLONDEL, Membre de l'Institut.
P. BRENOT, Directeur à la Cie Générale de T. S. F.
J. CORNU, Chef de bataillon du Génie e. r.
† A. PÉROT, Professeur à l'Ecole Polytechnique.
J. PARAF, Directeur de la Sté des Forces Motrices de la Vienne.
La Société des Ingénieurs Coloniaux.

BUTS ET AVANTAGES OFFERTS

La Société des Radioélectriciens, fondée en 1921 sous le titre « Société des Amis de la T. S. F. », a pour buts (art. 1 des statuts) :

1° De contribuer à l'avancement de la Radiotélégraphie théorique et appliquée, ainsi qu'à celui des Sciences et Industries qui s'y rattachent ;

2° D'établir et d'entretenir entre ses membres des relations suivies et des liens de solidarité.

Les avantages qu'elle offre à ses membres sont les suivants :

1° Service gratuit de la revue mensuelle *l'Onde Electrique* ;

2° Réunions mensuelles, avec conférences, discussions et expériences sur tous les sujets d'actualité technique ;

3° Visites de diverses installations radio-électriques : stations d'émission et de réception, postes de navires et d'avions, laboratoires, radiophares, expositions, studios, etc ;

4° Bibliothèque et prêt de livres ou de revues à domicile ;

5° Abonnements circulaires à certaines revues ;

6° Renseignements de tous ordres (joindre un timbre pour la réponse).

COTISATIONS

Elles sont ainsi fixées :

1° Membres titulaires, particuliers ..... 500 fr.
— sociétés ou collectivités ..... 2.000 fr.

2° Membres titulaires, âgés de moins de vint-cinq ans, pourront bénéficier d'une réduction de 40 % sur leur cotisation.

Les membres de ces deux catégories, résidant à l'étranger, doivent verser en plus un supplément pour frais postaux de 200 fr.

3° Membres à vie :

Les particuliers, membres titulaires, peuvent racheter leur cotisation annuelle par un versement unique égal à quinze fois le montant de cette cotisation, soit ..... 7.500 fr.

4° Membres donateurs :

Seront inscrits en qualité de donateurs, les membres qui auront fait don à la Société, en plus de leur cotisation, d'une somme égale au moins à ..... 1.000 fr.

5° Membres bienfaiteurs :

Auront droit au titre de « Bienfaiteurs », les membres qui auront pris l'engagement de verser pendant cinq années consécutives, pour favoriser les études ou publications techniques ou scientifiques de la Société une subvention d'au moins ..... 2.000 fr.

Adresser la correspondance administrative et technique, et effectuer le versement des cotisations à l'adresse suivante :

SOCIETE DES RADIOELECTRICIENS
14, avenue Pierre-Larousse, Malakoff (Seine)
Tél. : ALESIA 04-16- Compte de chèques postaux n° 697-38

Les correspondants sont priés de rappeler chaque fois le numéro d'inscription porté sur leur carte.
CHANGEMENTS D'ADRESSE : Joindre 10 francs à toute demande.

SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS

PRÉSIDENTS D'HONNEUR

R. MESNY (1935) ; — † H. ABRAHAM (1910).

ANCIENS PRESIDENTS DE LA SOCIETE

	MM.
1922	M. DE BROGLIE, Membre de l'Institut.
1928	H. BOUSQUET, Prés. du Cons. d'Adm. de la Cie Gle de T. S. F.
1924	R. DE VALBREUSE, Ingénieur.
1925	† J.-B. POMEY, Inspecteur général des P. T. T.
1926	E. BRYLINSKI, Ingénieur.
1927	† Ch. LALLEMAND, Membre de l'Institut.
1928	Ch. MAURAIN, Doyen de la Faculté des Sciences de Paris.
1929	L. LUMIÈRE, Membre de l'Institut.
1930	Ed. BELIN, Ingénieur.
1931	C. GUTTON, Membre de l'Institut.
1932	P. CAILLAUX, Conseiller d'Etat.
1933	L. BRÉGUET, Ingénieur.
1934	Ed. PICAULT, Directeur du Service de la T. S. F.
1935	R. MESNY, Professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité.
1936	R. JOUAUST, Directeur du Laboratoire Central d'Electricité.
1937	F. BEDEAU, Agrégé de l'Université, Docteur ès sciences.
1938	P. FRANCK, Ingénieur en chef de l'Aéronautique.
1939	† J BETHENOD, Membre de l'Institut.
1940	† H. ABRAHAM, Professeur à la Sorbonne.
1945	L. BOUTHILLON, Ingénieur en chef des Télégraphes.
1946	R. P. P. LEJAY, Membre de l'Institut.

BUREAU DE LA SOCIETE

Président :

M. R. BUREAU, Directeur du Laboratoire National de Radioélectricité.

Vice-Présidents :

MM. M. PONTE, Directeur du C. R. T. de la Cie Gle de T. S. F.
Y. ROCARD, Professeur à la Sorbonne.
R. BARTHÉLEMY, Membre de l'Institut.

Secrétaire général :

M. R. RIGAL, Ingénieur en chef des P. T. T.

Trésorier :

M. R. CABESSA, Ingénieur au L. C. T.

Secrétaires :

MM. Ph. LE CALVEZ, Ingénieur des P. T. T.
M. LIBOIS, Ingénieur des P. T. T.
Y. ANGEL, Ingénieur à la Radiodiffusion Française.

SECTIONS D'ETUDES

N°	Dénomination	Présidents	Secrétaires
1	Etudes générales.	M. DE MARE.	M. FROMY.
2	Matériel radioélectrique.	M. AUBERT.	M. ADAM.
3	Electro-acoustique.	M. BEDEAU.	M. POINCELOT.
4	Télévision.	M. BARTHÉLÉMY	M. ANGEL.
5	Hyperfréquences.	M. CLAVIER.	M. GOUDET.
6	Electronique.	M. LÉAUTÉ.	M. BRACHET.
7	Documentation.	M. VILLENEUVE.	M. CHARLET.

Les adhésions pour participation aux travaux des sections doivent être adressées au Secrétariat de la Société des Radioélectriciens, 10, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine).

INFORMATIONS

CONGRÈS DE LA « BRITISH INSTITUTION OF RADIO ENGINEERS »

La « British Institution of Radio Engineers » organise du 19 au 23 mai, à Bournemouth, un congrès dont le programme détaillé sera arrêté prochainement et à l'occasion duquel des communication inédites seront présentées.

Une participation française est prévue.

Les membres de la Société qui désireraient assister aux séances du congrès sont priés de faire connaître d'urgence leur nom au secrétariat de la société.

MANIFESTATION DU CENTENAIRE DE l'A. I. Lg.

L'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège (A. I. Lg.) célèbre cette année son centenaire. Elle organise à cette occasion un Congrès et une Exposition auxquels sont cordialement invités ingénieurs et industriels.

Le Congrès, qui a pour titre « Passé, Présent et Avenir de notre Industrie » tiendra ses assises à Liège, du Samedi 30 Août au Samedi 13 Septembre 1947.

Son activité sera répartie entre les 14 sections suivantes : *mines, géologie, métallurgie, mécanique, électricité, chimie, génie civil, transports, agronomie, questions économiques, professionnelles et sociales, section coloniale, textiles, alimentation, art de l'ingénieur et art de la musique.*

Plus de 700 rapporteurs, répartis dans ces sections, dresseront le bilan de l'état actuel de l'activité industrielle en Belgique et s'efforceront surtout de dégager ses perspectives et possibilités d'avenir.

Pendant le mois d'août et de septembre, sous le nom « Salon International de la Recherche Scientifique et du Contrôle Industriel », une Exposition se tiendra dans les trois Instituts de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège.

Elle se propose de mettre en évidence les méthodes et appareils tant de recherches pures que de contrôle industriel, que les circonstances n'avaient peut-être pas suffisamment développés dans nos milieux et surtout ceux qui ont amené le formidable effort industriel de guerre.

De nombreux laboratoires y seront montrés en activité ; ils seront à la disposition des visiteurs pour d'éventuels essais.

Par des exemples d'applications vécues et de résultats obtenus, des firmes belges et étrangères affirmeront la valeur des formules préconisées.

Une large participation de constructeurs belges et étrangers est dès maintenant assurée.

OFFRES D'EMPLOI

02. — Etablissement Marine à Saint-Tropez demande pour Laboratoire électronique, électro-acoustique et magnétisme :

1° Un jeune ingénieur ou chercheur de très bonne formation scientifique ;

2° Un ingénieur de très bonne formation, ayant plusieurs années de pratique de laboratoire ;

3° Un bon agent technique ayant pratique de laboratoire.

Nationalité française. Ecrire avec *curriculum vitæ* au Directeur de l'Etablissement de Saint-Tropez (Var).

LISTE DES NOUVEAUX MEMBRES

MM.	Présentés par MM.
ARNAUD (Gaston), Ingénieur au Service des Transmissions de l'Intérieur	Mme BOURGEAUX.
AUMONT (Bernard), Ingénieur	THIBIEROZ.
BAL (Noël), Radio S. T. I.	Mme BOURGEAUX.
BASSEGUY (Jean), Technicien-Radio	BLANCHO.
BELLEMIN (Raphaël), Ingénieur E. C. P.	CHIREIX.
BENE (Georges), chef centre Radioélectrique du Ministère de l'Intérieur à Baden-Baden	Mme BOURGEAUX.
BENICHOU, Ingénieur	GUÉNARD.
BLIN (Jacques), Agent technique radioélectricien	RIGAL.
BOISSINOT (Pierre), Officier aviateur	RIGAL.
BONNEL (Pierre), Officier aviateur, ingénieur radio E. S. E	ANGEL.
BONNICHON (Pierre), Ingénieur	PONTE.
BOUIX (Maurice), Ingénieur	GOUDET.
BOUSSEAU (Gérard), Etudiant à l'Ecole de Radioélectricité de Bordeaux	CAU.
BRULIN (Gilbert), Elève à l'E. S. E. (Radio)	PONTE.
BURGERT (Albert), Agent technique	QUINET.
BUSQUET (Pierre), Aspirant de Transmissions	CHOLESKY.
CACHON (Pierre), Etudiant	SAVORNIN.
CAMUZEAUX (Serge), Radioélectricien	Mme BOURGEAUX.
CARPENTIER (Georges), Agent technique	QUINET.
CAZENAVE (Raymond), Ingénieur à la S. F. R.	AUBERT.
CHAGOURY (Edmond), Ingénieur électricien mécanicien	Lt-Cl. ANGOT.
CHAMPION (Pierre), Radioélectricien	RIGAL.
CHARON (Michel), Opérateur radio Transmissions de l'Intérieur	Mme BOURGEAUX.
CHARRIER (Pierre), Ingénieur S. I. T.	Mme BOURGEAUX.
CHASTE (Roger), Etudiant	MAGNE.

(Voir suite page 76)

ÉTIENNE CHIRON (1873-1947)

Voici quelques mois, notre Société célébrait son vingt-cinquième anniversaire et, en présence des résultats obtenus, nous pouvions tourner avec joie et reconnaissance nos pensées vers ses fondateurs et ses animateurs : ils avaient mis tous leurs moyens au service de leur foi en l'avenir, ils avaient réalisé pour nous le puissant levier qui rend notre tâche actuelle à la fois plus aisée et plus fructueuse.

Aujourd'hui un deuil nous frappe en la personne de l'un d'eux, Etienne Chiron, éditeur de l'*Onde Electrique,* décédé le 8 janvier, à l'âge de 73 ans. Dans ses toutes dernières années, il s'était vu contraint de réduire progressivement son activité, mais ceux d'entre nous qui ont été en contact avec lui depuis la fondation de la Société des Amis de la T.S.F. ne peuvent se souvenir que du fougueux éditeur, aimable et conciliant, toujours prêt à se mettre en campagne pour surmonter les obstacles, pour remettre en route les affaires « mal goupillées ». Pour eux, Chiron est aussi le sociétaire numéro un, le premier inscrit, celui dont le nom figure en tête de la liste de nos membres.

Quand en 1921, le général Ferrié jugea le moment venu de fonder une société susceptible de grouper les « sans-filistes » — comme on disait alors — et d'assurer la liaison indispensable entre les chercheurs de toutes catégories, officiels ou non, savants réputés ou amateurs, s'il s'adressa à Chiron en vue de la publication d'une revue, c'est qu'il savait l'intérêt que cet éditeur avait toujours manifesté pour les nouveautés scientifiques en général, et pour les premiers essais de la T.S.F. en particulier. Au départ surtout, il ne suffisait pas de traiter commercialement une affaire, il fallait pouvoir compter sur un large concours capable de guider les premiers pas de la publication et de lui assurer un grand nombre de lecteurs en dehors des membres mêmes de la Société, disposé à supporter avec elle les aléas de l'entreprise. Chiron répondait à ces conditions ; pendant les douze années où j'ai rempli les fonctions de secrétaire général, mes rapports constants avec lui m'ont permis de le vérifier tous les jours et d'apprécier tout l'avantage qu'en retirait la Société. A la fin de chaque année, nous examinions ensemble les prévisions budgétaires de l'année suivante ; presque toujours la même difficulté se présentait : écart croissant entre les dépenses nécessitées par la publication de l'*Onde Electrique* — en ce temps-là aussi, les prix montaient — et les ressources de la Société ; chaque fois Chiron me tirait d'embarras en prenant sur lui la grosse part de la différence.

La Société des Radioélectriciens n'a pas été la seule à profiter de l'esprit entreprenant de Chiron. Quand la Société des Amis de la T.S.F. créa, avec le concours de MM. Chaumat et Lefrand, un cours élémentaire de radio au Conservatoire des Arts et Métiers, il fut indispensable de mettre au plus tôt un texte imprimé entre les mains des auditeurs si divers qui le suivaient ; le cours fut édité en un temps record. Tous les radioélectriciens connaissent, d'autre part, les nombreux ouvrages consacrés à tous les domaines de la radio qui sont sortis de la maison Chiron, bien souvent comme résultat de son initiative personnelle. Citons seulement la revue d'amateurs : *La T.S.F. pour Tous,* création directe de Chiron, qui eut tout de suite un succès que le temps n'a pas amoindri.

Notre Société perd en Etienne Chiron un des meilleurs « Amis de la T.S.F. », dont l'amitié s'est largement dépensée pour le succès de notre œuvre. Nous espérons que le souvenir que nous gardons de lui contribuera à atténuer la peine des siens.

René MESNY.
Président d'honneur de la Société des Radioélectriciens

CALCUL DES CONSTANTES ÉQUIVALENTES D'UNE LAME DE QUARTZ VIBRANT EN CISAILLEMENT PLAN (TYPE CT, DT)

PAR

G. DUMESNIL.

Agrégé de l'Université

On a démontré depuis déjà plusieurs années que le schéma équivalent d'un barreau de quartz vibrant en extension, ou d'une lame vibrant en cisaillement d'épaisseur (coupes X, AT, BT), pouvait être représenté, au voisinage de la résonance, par le schéma de la figure 1.

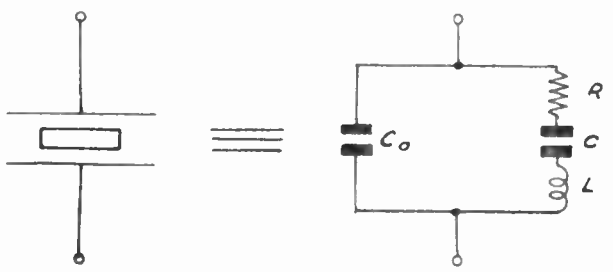


FIG. 1.

Il ne semble pas qu'une telle équivalence ait été démontrée pour les lames vibrant en cisaillement plan.

On se propose de le faire ici.

Dans tout ce qui suit, on suppose que le cisaillement plan n'est lié à aucun autre mode de mouvement et qu'on peut, en première approximation, appliquer aux plaques finies les équations générales des plaques infiniment étendues. La comparaison des résultats ainsi calculés avec les résultats expérimentaux montre que, malgré cette hypothèse, on rend assez bien compte des faits.

On néglige en outre, l'amortissement.

Position du problème :

Soit une lame d'orientation quelconque, d'axes **OX' Y' Z'** liés à la plaque. Ce sera en particulier le cas d'une lame de quartz du type Y définie par l'angle θ représenté par la figure 2.

Les deux grandes faces sont totalement métallisées. Une *ddp* alternative de pulsation ω, de module $\overline{V}$ lui est appliquée. L'épaisseur de la lame étant y'_1 cette *ddp* créé dans la plaque un champ de module

$$\overline{E}_{y'} = \frac{\overline{V}}{y'_1}$$

(1) Classification décimale n° 116.1.

L'examen des relations connues liant les déformations aux champs montre que ce champ E'_y peut exciter seulement des déformations du type x_z (cisaillement plan) et y_x (cisaillement d'épaisseur). Les fréquences de résonance du type x_z, au moins pour le fondamental et les premiers partiels, sont beaucoup plus basses que celles du type y_x. Le cisaillement d'épaisseur n'aura donc qu'une faible amplitude et nous supposons le mode x_z pur.

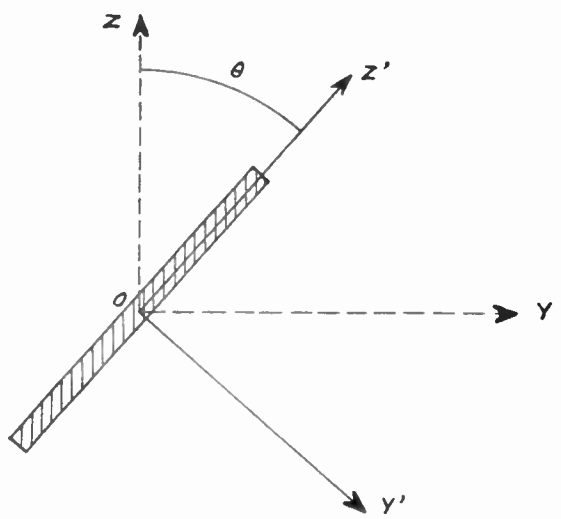


FIG. 2

I. — Equations du mouvement.

Admettons avec Sykes (1) et Ekstein (2) que la vibration fondamentale du cisaillement plan est une déformation du genre représenté figure 3 dont on peut traduire les déplacements u et w par les deux équations.

$$(1)\quad \begin{cases} u = A \sin \dfrac{\omega}{c} z \,.\, \sin \omega t \\ w = B \sin \dfrac{\omega}{c} x \,.\, \sin \omega t \end{cases} (1)$$

(1) Comme on raisonnera par la suite uniquement dans le plan X' OZ' on utilisera des lettres non accentuées afin de simplifier l'écriture.

Ces équations doivent vérifier les équations connues :

$$(2)\quad \begin{cases} \rho \dfrac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\dfrac{\partial X_z}{\partial z} \\ \rho \dfrac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\dfrac{\partial X_z}{\partial x} \end{cases}$$

Mais on sait que :

$$-x_z = s_{55} X_z - d_{25} E_y \qquad (3)$$

Soit en dérivant par rapport à z

$$-\frac{\partial x_z}{\partial z} = s_{55} \frac{\delta X_z}{\partial z} \qquad (4)$$

En portant (4) dans les équations (2) on voit que le mouvement représenté par les équations (1) satisfait aux équations fondamentales pourvu que :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho s_{55}}} \qquad (5)$$

La déformation x_z s'écrit alors :

$$\overline{x_z} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\omega}{c}\left(A \cos \frac{\omega}{c} z + B \cos \frac{\omega}{c} x\right) \qquad (6)$$

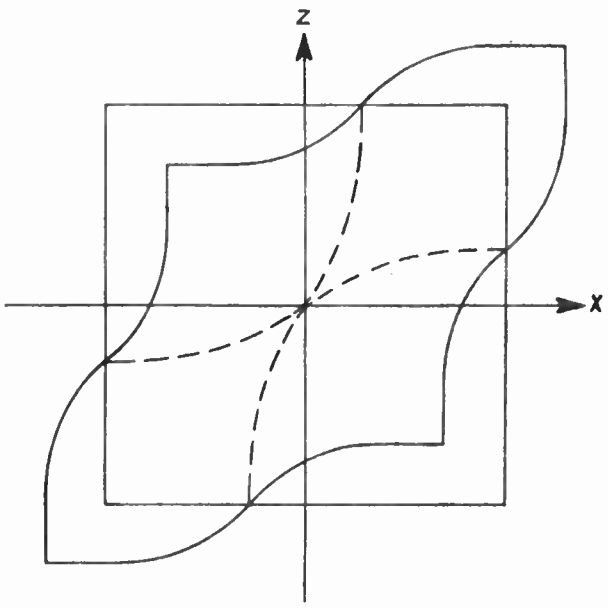


Fig. 3

II. — Calcul de la charge apparue sur les armatures du fait de la polarisation.

La charge apparue sur les armatures par polarisation est due à P_y.

Or, $$P_y = e_{25} x_z \qquad (7)$$

d'où :

$$\overline{Q} = \int_{-\frac{x_1}{2}}^{+\frac{x_1}{2}} dx \int_{-\frac{z_1}{2}}^{+\frac{z_1}{2}} e_{25} \frac{\omega}{c}\left(A \cos \frac{\omega}{c} z + B \cos \frac{\omega}{c} x\right) dz$$

x_1 et z_1 étant les dimensions de la plaque suivant Ox et Oz.

On trouve facilement :

$$\overline{Q} = 2 e_{25}\left[A \sin \frac{\omega}{c} \frac{z_1}{2} + B \sin \frac{\omega}{c} \frac{x_1}{2}\right] \qquad (8)$$

Dans la pratique, les plaques sont le plus souvent carrées. Posons $x_1 = y_1 = a$. En outre, les diagonales restent fixes dans l'espace (*Cf.* W. G. Cady *Piezoelectricity*, p. 109) donc : $A = B$. Alors

$$\boxed{\overline{Q} = 4 e_{25} a A \sin \frac{\omega}{c} \frac{a}{2}} \qquad (9)$$

III. — Calcul de l'amplitude A.

De façon générale la déformation x_z en un point est due d'une part à la force intérieure X_z exercée par la matière voisine et d'autre part au champ E_y. Ce que traduit l'équation connue :

$$-x_z = s_{55} X_z - d_{25} \cdot E_y \qquad (10)$$

Or X_z a dans toute la plaque une valeur finie et ne s'annule qu'au sommet des angles.

Aux coins de la lame $\left(x = \pm \frac{a}{2},\ z = \pm \frac{a}{2}\right)$ on peut donc écrire :

$$(x_z) = d_{25} \cdot E_y \qquad (11)$$

soit

$$2 \frac{\omega}{c} A \cos \frac{\omega}{c} \cdot \frac{a}{2} = d_{25} \frac{\overline{V}}{y_1}$$

et :

$$A = \frac{1}{2} d_{25} \frac{c}{\omega} \frac{\overline{V}}{y_1} \frac{1}{\cos \frac{\omega}{c} \frac{a}{2}} \qquad (12)$$

Alors :

$$\boxed{\overline{Q} = 2 e_{25} \cdot d_{25} \cdot \frac{c}{\omega} \cdot \frac{\overline{V}}{y_1} \cdot a \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega}{c} \frac{a}{2}} \qquad (13)$$

IV. — Calcul de l'impédance du cristal.

A cette charge de polarisation Q, il faut ajouter celle due au condensateur supposé rempli de diélectrique non piézo-électrique et de constante diélectrique égale à celle du quartz pour la direction normale aux grandes faces, soit

$$Q = C_0 V$$

avec

$$C_0 = \frac{k a^2}{4 \pi y_1} \qquad (14)$$

La charge totale est donc :

$$Q_t = Q_0 + Q$$

et le courant

$$i = \frac{d Q_t}{d t} = C_0 \frac{d V}{d t} + \frac{d Q}{d t} \qquad (15)$$

L'admittance du quartz est donc :

$$\overline{Y} = j \omega C_0 + j \omega \frac{\overline{Q}}{\overline{V}}$$

$$= j \omega C_0 + j \cdot 2 e_{25} d_{25} c \frac{1}{y_1} a \operatorname{tg} \frac{\omega}{c} \frac{a}{2}$$

$$= j Y_0 + j Y_1 \qquad (16)$$

et se compose (fig. 4) d'une capacité C_0 en parallèle avec une admittance

$$Y_1 = j \cdot 2 e_{25} d_{25} c \frac{1}{y_1} a \operatorname{tg} \frac{\omega}{c} \cdot \frac{a}{2} \qquad (17)$$

dont l'impédance est

$$Z_1 = -j \frac{y_1}{2 e_{25} d_{25} c a} \cot \frac{\omega}{c} \frac{a}{2} \qquad (18)$$

A la résonance, A doit être infinie (amortissement nul) ; donc, d'après (12)

$$\frac{\omega}{c}\frac{a}{2} = \frac{\pi}{2} \qquad \text{(fondamental)}$$

soit $$a = \frac{\lambda}{2}$$

et l'impédance Z_1 est nulle.

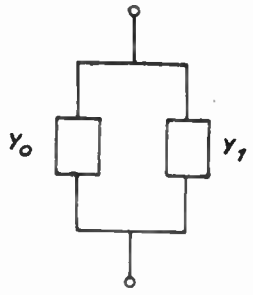


Fig. 4

V. — Schéma équivalent.

On voit qu'on retrouve pour Z_1 une expression en cotangente comme dans le cas des barreaux ou des plaques vibrant en épaisseur. Il suffit donc pour trouver les constantes équivalentes, de traiter cette impédance à la manière habituelle.

On sait qu'une première conséquence de l'équation (18) est que, quelle que soit la fréquence, on peut traiter le quartz comme une ligne à constantes réparties. Nous ne nous y attarderons pas.

La seconde conséquence, qui nous occupera seule ici, c'est que, *au voisinage de la résonance*, l'impédance Z_1 peut être considérée comme celle d'une self et d'une capacité en série. Il suffit pour cela que la courbe $Z_1\ (\omega)$ et la courbe $Z'\ (\omega) = L\,\omega - \frac{1}{\omega}$ coupent l'axe ω au même point $\omega = \omega_R$ et aient même tangente en ce point.

La première condition donne :

$$\left.\begin{aligned} &\text{pour } Z' : L C \omega_R^2 = 1 \\ &\text{pour } Z_1 : \frac{\omega_R}{c}\frac{a}{2} = \frac{\pi}{2} \end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

et la deuxième condition :

$$\frac{d}{d\omega}\left(L\,\omega - \frac{1}{c\,\omega}\right) = \frac{d}{d\omega}\left(\frac{-y_1}{2\,e_{25}\,d_{25}\,c\,a}\cot\frac{\omega}{c}\frac{a}{2}\right) \qquad (20)$$

soit

$$2L = \frac{y_1}{4\,c^2\,e_{25}\,d_{25}}$$

$$L = \frac{y_1}{8\,c^2\,e_{25}\,d_{25}} \qquad (21)$$

et, tenant compte de $c^2 = \frac{1}{\rho\,s_{55}}$ (5) il vient en rétablissant les accents :

$$\boxed{L = \frac{\rho\,s'_{55}}{8\,e'_{25}\,d'_{25}}\,y_1} \qquad (22)$$

qu'on peut écrire :

$$\boxed{L = L_0\,y_1} \qquad (23)$$

d'où l'on déduit C par la relation $L\,C\,\omega_R^2 = 1$.

Si les constantes sont évaluées en unités CGS et UES CGS (23) devient :

$$\boxed{L_0 = \frac{\rho . s'_{55}}{8'\,e_{25}\,d'_{25}} .9.10^{11}\ \frac{\text{henries}}{c\,m}} \qquad (23')$$

On voit que pour une orientation donnée de la plaque, L *ne dépend que de l'épaisseur et lui est proportionnelle*, ce qui est conforme à l'expérience.

Comme par ailleurs C_0 est inversement proportionnel à y_1 le produit LC_0 est constant, ce qui peut être intéressant dans la construction des filtres.

Application aux coupes CT *et* DT.

On calcule $s'_{55}\ e'_{25}\ d'_{25}$ par les relations connues :

$$\left\{\begin{aligned} s'_{55} &= s_{44}\,c^2 + s_{66}\,s^2 + 4\,s_{14}\,s\,c \\ e'_{25} &= -e_{14}\,c^2 - e_{11}\,s\,c \qquad (s = \sin\theta) \\ d'_{25} &= -d_{14}\,c^2 - 2\,d_{11}\,s\,c \qquad (c = \cos\theta) \end{aligned}\right.$$

Utilisons les valeurs les plus récentes données par W. G. Cady (3) (valeurs CGS et UES CGS).

$s_{44} = 2{,}00.10^{-12}$	$e_{14} = -1{,}2.10^4$	$d_{14} = 2{,}0.10^{-8}$
$s_{66} = 2{,}88\ 10^{-12}$	$e_{11} = -5{,}2.10^4$	$d_{11} = -6{,}9.10^{-8}$
$s_{14} = -0{,}43\ 10^{-12}$		

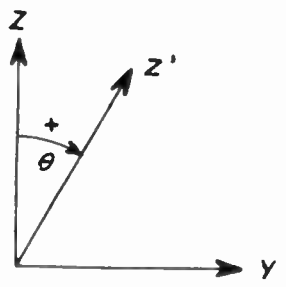


Fig. 5

On trouve ainsi :

Pour la coupe CT ($\theta = +38°$) : $L_0 = 25{,}1$ henries/mm.

Pour la coupe DT ($\theta = -52°30'$) : $L_0 = 64{,}0$ henries/mm.

Valeurs en bon accord avec celles trouvées expérimentalement par Bechmann (4) qui sont :

Pour CT : 22,0 H/mm. soit un écart de 12 %.

Pour DT : 61,3 H/mm. soit un écart de 4 %

BIBLIOGRAPHIE

1. Sykes. — Modes of motion in quartz crystals, the effects of coupling and methods of design. *BSTJ* vol. 23, pp. 52-96,1944.

2. Ekstein. — Free vibrations of anisotropic bodies. *Phys. Rev.*, vol. 66, pp. 108-118, 1944.

3. Cady. — Piezoelectricity, Mc Graw Hill, 1946.

4. Bechmann. — Oscillateurs et résonateurs à quartz dans le domaine 50-300 Kc. *Hfr. u. El. Ak.*, vol. 61, pp.1-12, 1943.

LES ERUPTIONS DE LA CHROMOSPHÈRE SOLAIRE ET LEURS RÉPERCUSSIONS SUR L'IONOSPHÈRE ET SUR LA PROPAGATION DES ONDES LEURS EFFETS DANS LES DIVERSES RÉGIONS DU SPECTRE RADIOÉLECTRIQUE [1]

PAR

ROBERT BUREAU,

Directeur du Laboratoire National de Radioélectricité,

Président de la Société des Radioélectriciens.

SOMMAIRE

Cet article expose des résultats nouveaux relatifs aux perturbations à début brusque que l'ionosphère et que la propagation subissent de la part des éruptions chromosphériques brillantes du soleil. La principale source de documentation est l'enregistrement permanent du niveau des atmosphériques sur ondes très longues (10.000 m. et ondes avoisinantes), complétée par des enregistrements répartis de 20 m. à 24.000 m. de longueur d'onde. Ils portent, soit sur le niveau moyen des atmosphériques, soit sur le champ de certains émetteurs. La comparaison avec des travaux britanniques relatifs au champ d'ondes très longues met en évidence un effet spectral qu'on peut interpréter sous la forme d'un effet d'altitude. L'auteur étudie ensuite comment s'effectue la transition entre les deux phénomènes radioélectriques essentiels que suscite une éruption chromosphérique et qui sont l'évanouissement brusque des ondes décamétriques et le renforcement brusque des ondes kilométriques supérieures. Certains exemples montrent un curieux comportement de l'onde de 2.000 m. qui peut, au cours de la même éruption, accuser successivement évanouissement et renforcement. Là aussi les résultats sont interprétés au moyen d'un effet d'altitude. Le mois de février 1946 est remarquable entre tous par le passage sur le disque solaire de groupes de taches et d'éruptions d'une superficie et d'une importance qui semblent parfois dépasser tout ce qui a été observé jusqu'ici. Les phénomènes radioélectriques concomittents sont présentés avec l'appui d'un certain nombre d'exemples. La plupart reproduisent des renforcements sur ondes très longues et des évanouissements simultanés sur ondes courtes assurés au même lieu. C'est probablement la première fois qu'on a pu le faire. Deux exemples de cas exceptionnels sont présentés et commentés ainsi que deux cas d'un évanouissement sur 24.000 m. Là aussi, une explication est proposée dans le sens d'une structure particulière de la région D anormale.

1. Généralités.

Les éruptions chromosphériques du soleil provoquent fréquemment de brutales perturbations de l'ionosphère. Le fait est maintenant hors de doute. Ces perturbations se manifestent de deux manières : par les évanouissements brusques des ondes courtes (désignés par l'un des termes suivants : évanouissements brusques, radiofadeout, sudden ionospheric disturbance, catastrophic ionospheric disturbances, etc...) et par le renforcement brusque des ondes longues, mis principalement en évidence par l'enregistrement des parasites atmosphériques.

Nous avons désigné ce phénomène sous le terme « perturbations ionosphériques à début brusque » (P.I.D.B.). D'autre part, on emploie aussi l'abréviation S.I.D., abréviation de « sudden ionospheric disturbance ».

C'est grâce à l'enregistrement du niveau moyen des atmosphériques sur 10.000 m. de longueur d'onde que nous avons pu signaler l'augmentation brutale des champs, sur les ondes très longues, qui se manifeste au moment même des évanouissements brusques sur ondes décamétriques. Cette constatation date de 1936. Comme nous avons enregistré le niveau moyen des atmosphériques depuis 1928, tout d'abord dans la région parisienne, puis en Afrique du Nord (Tunisie et Maroc), nous avons pu remonter dans le temps, établir et reconstituer ainsi des variations du phénomène pendant une durée dépassant celle du cycle solaire undécennal. Le résultat révèle une variation undécennale de très grande amplitude du nombre des P.I.D.B., qui va de 0 en douze mois à environ 200 en douze mois, en phase avec l'activité solaire. Ce résultat a été publié par ailleurs (2). Cet article est consacré à des renseignements nouveaux, obtenus grâce au développement des moyens instrumentaux et, en particulier, à l'extension des enregistrements d'atmosphériques depuis les ondes décamétriques jusqu'aux ondes myriamétriques.

---

(1) Classification décimale n° 256.

(2) C. R. Ac. Sc., 219, N° 18, 6 novembre 1944, 461-463. — *La Météorologie*, n° 55-56-57, janv. juin 1945, p. 10-24.

Résumons tout d'abord l'ensemble des faits établis :

a) Les éruptions chromosphériques intenses déclenchent fréquemment (et d'autant plus fréquemment qu'elles sont plus intenses) une ionisation anormale des régions inférieures de l'ionosphère ;

b) Cette ionisation s'établit avec une brusquerie si étrange qu'elle a souvent donné aux premiers observateurs l'impression d'une panne de matériel. Elle disparaît progressivement dans un délai de l'ordre de vingt à soixante-dix minutes ;

c) Elle affecte les régions inférieures de l'ionosphère ; mais elle paraît le plus souvent sans action sur les régions habituelles de réflexion des ondes courtes, c'est-à-dire sur les régions E et F.

d) Elle forme pour les ondes courtes un écran absorbant tendu sous les régions E et F, et se trouve donc localisée dans la région D ;

e) Elle crée pour les ondes très longues une couche de coefficient de réflexion très élevé et accroît par suite fortement leur portée. La partie du spectre radioélectrique ainsi avantagée est limitée très nettement, du côté des ondes les plus longues, à 16.000 m. de longueur d'onde et cette limite varie très peu dans le temps. L'autre limite est moins nette et plus variable (entre 2 km. et 7 km.) ;

f) Elle s'accompagne de perturbations synchrones et caractéristiques des diverses composantes du champ magnétique terrestre, ainsi que de perturbations des courants telluriques ;

g) Les perturbations magnétiques font souvent varier les composantes du champ terrestre dans le même sens que le fait au même moment la variation diurne ; ce qui montre que ce sont les mêmes régions de l'ionosphère qui sont responsables et de la variation diurne du magnétisme, et des perturbations accompagnant les éruptions chromosphériques ;

h) L'ionisation anormale s'étend à toute la partie éclairée du globe ; elle n'existe pas dans l'hémisphère nocturne ;

i) Le nombre des manifestations suit de près la variation undécennale solaire et accuse une très grande variabilité, ainsi que nous l'avons rappelé ci-dessus.

L'observation ou l'enregistrement radioélectrique des P.I.D.B. fait appel à des méthodes très diverses :

a) L'observation des évanouissements à début brusque dans le trafic radioélectrique sur ondes courtes. Cette méthode met en évidence l'effet de l'éclairement des trajets ;

b) L'enregistrement du champ d'un émetteur travaillant sur ondes courtes ;

c) L'enregistrement sur onde fixe des hauteurs équivalentes des régions E et F de l'ionosphère et celui, sur onde variable, des fréquences critiques des mêmes régions ;

d) L'enregistrement permanent du niveau des atmosphériques, en particulier sur ondes longues ;

e) Les mesures diverses du champ d'émetteurs sur ondes très longues ;

f) Enfin l'enregistrement des bruits radioélectriques solaires, ainsi que l'a montré tout récemment Appleton (1).

Ces diverses méthodes sont appliquées soit en permanence, soit par intermittence, les unes en une localité, les autres ailleurs. Aucun programme international ne les a encore coordonnées. En aucun lieu elles n'ont encore été mises en œuvre toutes à la fois. Mais, étant donné la portée mondiale du phénomène et le synchronisme de ses manifestations, il est possible de confronter avec fruit les résultats d'observations de diverses natures faites en différents lieux, et surtout les photographies d'enregistrements.

Le même procédé s'applique à la comparaison des enregistrements radioélectriques avec les observations et les enregistrements astrophysiques, magnétiques, optiques.

I. — ALTITUDE DE L'IONISATION ANORMALE

2. La région D anormale.

L'un des problèmes les plus importants posés par l'effet des éruptions est la détermination de l'altitude à laquelle se développe l'ionisation anormale de l'ionosphère. Le fait que cette ionisation renforce les ondes très longues, au moment même où elle entraîne l'évanouissement des ondes courtes, permet déjà d'en localiser l'altitude sous la région E, ce qui est d'ailleurs en accord avec d'autres conséquences des effets produits par l'éruption. Nous donnerons à la région d'altitude plus basse que E, où se développe une ionisation anormale sous l'effet des éruptions chromosphériques, le nom de région D anormale.

Il devient assez difficile de préciser les limites d'altitude de cette région d'ionisation anormale. Il se peut d'ailleurs très bien que ces limites soient variables. On a mesuré les hauteurs de réflexion des ondes très longues (2) (74 km. de jour et 90 km. de nuit). Mais ces chiffres ont trait à l'onde de 18.800 m. de longueur d'onde, c'est-à-dire, une onde dont le coefficient de réflexion reste inchangé pendant les éruptions chromosphériques. Si l'on admet l'hypothèse que j'ai proposée, et d'après laquelle les ondes en deçà ou au delà de 16.000 m. sont ou ne sont pas renforcées lors des éruptions suivant qu'elles atteignent ou qu'elles n'atteignent pas la région d'ionisation anormale, on en pourrait conclure que l'ionisation anormale se produit quelque part, entre 74 km. et la région E (tout au moins dans les conditions rencontrées par Best et ses collaborateurs au cours de leurs mesures).

Budden et Ratcliffe en 1937 (3) ; Budden, Ratcliffe et Wilkes en 1939 (4), ont signalé l'effet de

(1) *The Philosop. Mag.*, 37, 1946, p. 73.
(2) Best, Ratcliffe et Wilkes, *Proc. Roy. Soc. A.* 156, 1936, p. 614.
(3) *Nature* 140, 1937, 1060.
(4) *Proc. Roy. Soc. A*, 171, 1939, 188.

P.I.D.B. sur les ondes très longues, se traduisant par une anomalie dans la phase de la composante anormale (vecteur électrique parallèle au sol) de l'onde, un peu avant le coucher du soleil. Cette anomalie est une traduction d'une anomalie dans la hauteur de réflexion ; leur mesure de la phase de la composante anormale est une mesure de la hauteur de réflexion. Dans le second des travaux précités, ils signalent que pour les valeurs de l'angle de phase mises en jeu et pour des hauteurs d'environ 70 km., on peut passer de l'échelle des phases à celle des hauteurs de réflexion en admettant que 100° représentent 3,16 km.

Chacun des deux papiers précités donne un exemple accompagné de figures. Nous allons les comparer aux enregistrements d'atmosphériques des mêmes dates.

3. Exemple du 6 novembre 1936.

A 90 km. de distance, l'onde de 17.500 m. émise par Rugby accuse une anomalie de phase (diminution brutale de l'angle de phase révélant une chute de la hauteur de réflexion) pendant la montée habituelle qui précède le coucher du soleil (Budden et Ratcliffe, *loc. cit.*).

La fig. 1 reproduit telle qu'elle a été publiée la figure de Budden et Ratcliffe ; on y trouve les points d'observation et la courbe tracée par les auteurs (en abscisses les heures, en ordonnées les angles de phase).

FIG. 1

La fig. 2 (1) superpose avec les mêmes échelles de temps la fig. 1 (réduite aux points d'observation) et les enregistrements d'atmosphériques sur 10.000 m. à Rabat, sur 11.000 m. à Paris-Saint-Cyr, sur 13.500 m. à Paris et sur 25.000 m. à Paris-Saint-Cyr. Un renforcement brusque s'inscrit sur tous les enregistrements d'atmosphériques, sauf sur 25.000 m. Il débute à 16 h. 12, culmine à 16 h. 23 et se termine à 16 h. 58. L'anomalie de Rugby (baisse de 4 km. 4 de la hauteur de réflexion) se produit entre 15 h. 52 et 16 h. 18, intervalle entre les deux mesures qui encadrent la discontinuité.

(1) Dans la figure 2 et dans les suivantes, il est fourni souvent plusieurs courbes du niveau d'atmosphériques. Dans ce cas la figure porte auprès de chaque courbe l'indication du lieu d'enregistrement ainsi que la longueur d'onde en km ou en m.

Le *Bulletin de l'Union Astronomique Internationale* signale le 6 novembre une éruption chromosphérique d'importance 2, observée en cours de développement à Huancayo (Pérou), de 16 h. 24 à 16 h. 50. L'heure exacte de début est inconnue, mais antérieure à 16 h. 24.

Dans les documents publiés par le Comité français de Radiotélégraphie scientifique (M. Jouaust), nous relevons les évanouissements suivants, relatifs au 6 novembre 1936 :

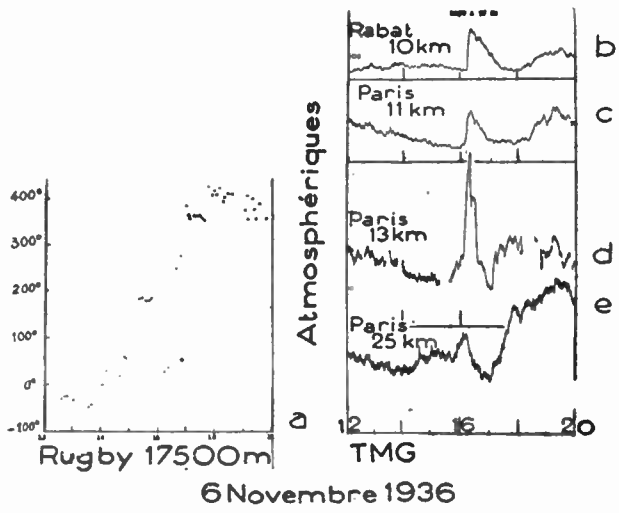


FIG. 2

A 16 h. 12 (Compagnie Radio-France), sur les circuits :

Paris-Amérique du Nord ;
Paris-Buenos-Ayres ;
Paris-Rio de Janeiro.

A 16 h. 45, le trafic est redevenu normal. A 16 h. 15 (postes japonais), affaiblissement général sur les circuits de l'Amérique du Nord et du Sud.

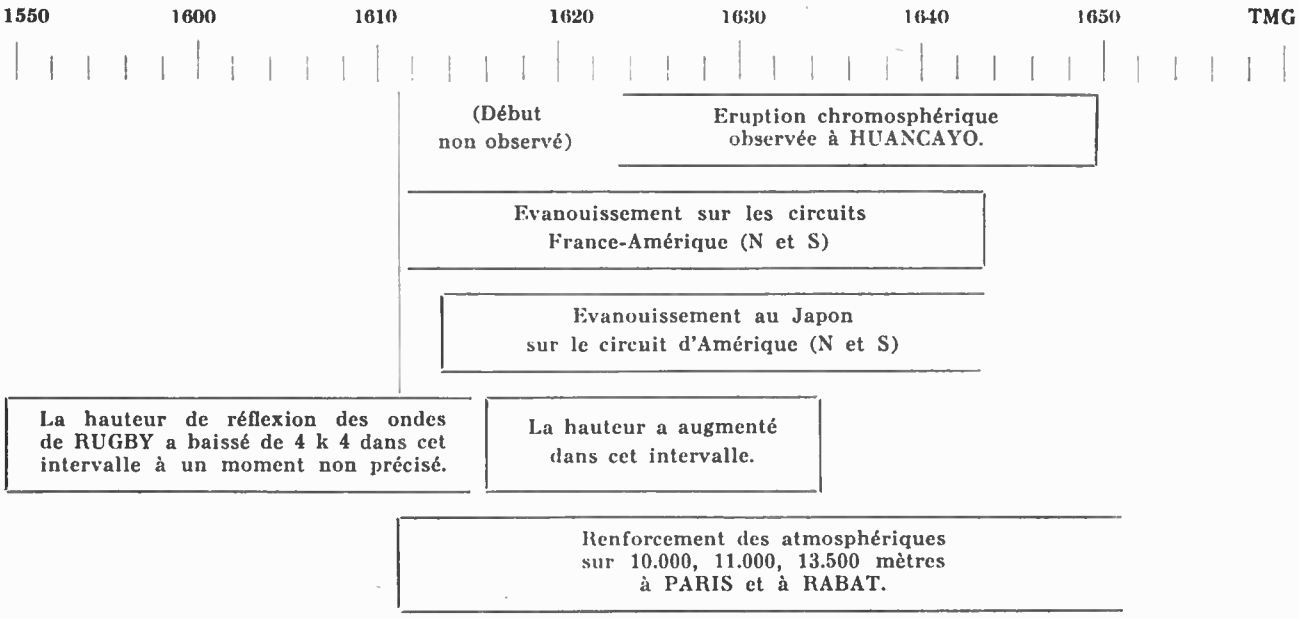
En résumé, le synchronisme du début de toutes les manifestations du phénomène est vraisemblable comme il ressort du tableau I :

Ce synchronisme du début paraît un fait assez général ; il s'accorde avec la violence exceptionnelle de ce début dans toutes les manifestations, violence qui est celle d'une véritable explosion. Le retour à la normale est, par contre, progressif et il est souvent difficile d'en noter l'heure avec précision.

Ce n'est pas toutefois ce qui est le plus important dans l'observation du 6 novembre. L'effet de « spectre » est plus riche en conséquences : l'ionisation anormale a provoqué un effet d'amplitude sur les ondes longues de 10.000 m. à 13.500 m. au moins. Cet effet d'amplitude n'existe plus sur 17.500 m. (Rugby), ni sur 25.000 m. (Paris). Mais un effet d'altitude a été observé sur Rugby. Avant d'en tirer des conclusions sur la répartition en altitude de l'ionisation anormale, il convient de vérifier que les différences constatées sont bien dues à la différence des longueurs d'onde et non à une autre cause. Un second exemple va nous permettre cette vérification.

TABLEAU 1

(6 *novembre* 1936)


1550
1600
1610
1620
1630
1640
1650
TMG
(Début non observé)
Eruption chromosphérique observée à HUANCAYO.
Evanouissement sur les circuits France-Amérique (N et S)
Evanouissement au Japon sur le circuit d'Amérique (N et S)
La hauteur de réflexion des ondes de RUGBY a baissé de 4 k 4 dans cet intervalle à un moment non précisé.
La hauteur a augmenté dans cet intervalle.
Renforcement des atmosphériques sur 10.000, 11.000, 13.500 mètres à PARIS et à RABAT.

4. Exemple du 24 mars 1938.

Dans leur travail de 1939 (*loc. cit.*), Budden, Ratcliffe et Wilkes ont, eux aussi, cherché la raison pour laquelle ils n'avaient pas observé un renforcement d'amplitude sur Rugby pendant les P.I.D.B. Ils ont tenté de vérifier si la distance faible (90 km.) qui les séparait de Rugby ne donnait pas l'explication cherchée. A cet effet, ils ont étudié la propagation de Lyon-FYN à 770 km. (Cambridge). La longueur d'onde de Lyon est 15.150 m. Ils ont constaté entre le 1er mars et le 15 mai 1938 des anomalies à début brusque dont la figure 3a donne un exemple.

Dans cette période, trente-quatre anomalies ont été observées sur les signaux de FYN. « Toutes, sauf trois, donnaient un renforcement du signal... Chaque anomalie de phase observée sur Rugby était accompagnée d'une anomalie dans l'enregistrement sur Lyon. Sur les trente-quatre anomalies observées de Lyon, deux ne coïncident avec aucun autre effet catastrophique, trente et une coïncident avec un évanouissement brusque sur ondes courtes, dix-huit avec des renforcements signalés d'atmosphériques et neuf avec des éruptions chromosphériques signalées par l'Observatoire de Physique solaire de Cambridge. »

Les auteurs concluent qu'à faible distance (incidence proche de la normale), la perturbation peut être mise en évidence par l'anomalie de phase, mais que pour les incidences plus obliques, il y a renforcement du signal.

La figure 3 ne permet pas de retenir cette conclusion sous cette forme. Elle montre en effet que des renforcements d'atmosphériques particulièrement expressifs accompagnent le renforcement de Lyon à Cambridge, mais que aucun renforcement d'atmosphériques ne se manifeste ni sur 25.000 m. ni sur 17.000 m. Comme nous avons constaté que

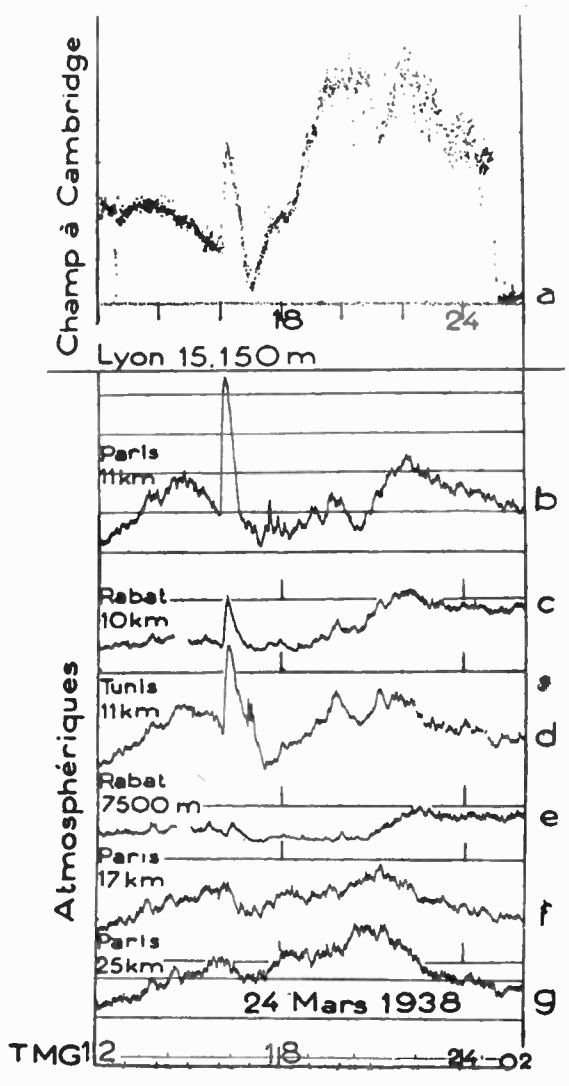


FIG. 3

la longueur d'onde de 16.000 m. forme la limite en deçà de laquelle s'observent les renforcements et au delà de laquelle ils ne s'observent plus, il en résulte que Lyon est dans la première catégorie et Rugby dans la seconde. Il y a donc là un effet de spectre et non un effet de distance.

L'effet de distance semble se retrouver dans les affaiblissements de Rugby à Cambridge (méthode de la phase) constatés au moment de certaines P.I.D.B.

5. Essai d'explication.

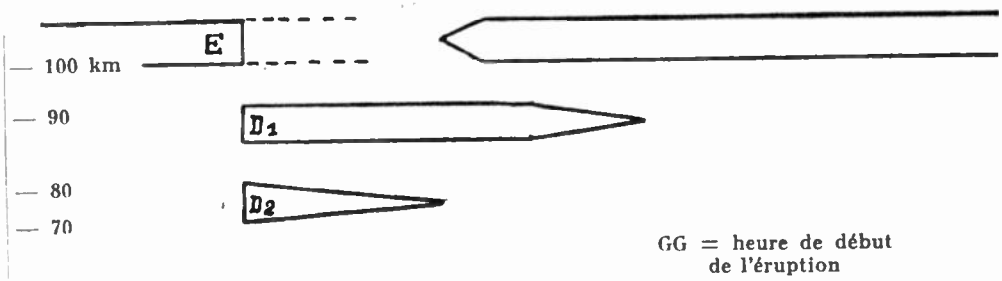
Si l'on retient l'hypothèse avancée plus haut (altitudes de réflexion diminuant quand la longueur d'onde augmente), il faut la compléter et admettre que si le maximum d'ionisation, générateur de l'effet d'amplitude, se produit au-dessus du niveau de réflexion de l'onde 17.000 m., la région D anormale se prolonge, affaiblie, plus bas que ce niveau. Cette prolongation peut difficilement être attribuée à la diffusion des électrons libérés dans la principale région d'ionisation anormale, car cette fois, la figure 2 le montre nettement, l'effet de phase n'est guère postérieur à l'effet d'amplitude, il est même vraisemblablement synchrone.

On peut évoquer l'hypothèse de deux régions superposées d'ionisation anormale, l'une D_1 donnant lieu à l'effet d'amplitude, l'autre D_2, plus bas, à l'effet de phase (c'est-à-dire d'altitude).

Cette hypothèse faciliterait d'ailleurs l'explication d'un autre effet, déjà signalé dans le chapitre ci-après, qui est aussi un effet de spectre et qui est observé parfois sur les ondes d'environ 2.000 m. Il consiste, lors de P.I.D.B., en l'apparition successive sur cette onde d'un évanouissement brusque, puis d'un renforcement brusque. La région D_2 ionisée brusquement en même temps que D_1, mais moins fortement qu'elle, disparaîtrait plus rapidement du fait de la pression plus élevée (vitesse de recombinaison accrue). Elle serait traversée par les ondes de 10.000 m. à 16.000 m. sans effet appréciable ; mais elle pourrait jouer parfois déjà sur 2.000 m. l'effet d'écran absorbant qu'on observe sur les ondes courtes. Dès que l'action de l'éruption commence à décroître, l'ionisation de la région D_2 disparaît la première, les recombinaisons d'ions étant beaucoup plus rapides à plus basse altitude. A ce moment, 2.000 m. cesse d'être absorbé par D_2 et vient se réfléchir sur D_1. Ce processus s'observe quand l'ionisation de D_2 est telle que l'onde 2.000 m. entre dans la famille des ondes courtes (où l'absorption croît avec la longueur d'onde) et que l'ionisation de D_1 classe l'onde 2.000 m. dans la catégorie des ondes longues.

Le tableau 2 schématise cette hypothèse.

TABLEAU 2



ONDES COURTES	GG + 0	GG + 10 m	GG + 25 m	GG + 40 m
	Propagation normale, échos sur E et F.	Absorption brutale par écrans D_1 et D_2. Echos E et F disparus.	Absorption faiblit, le trafic réapparaît. Echos E et F reviennent.	Retour à la normale.
8.000 m $<\lambda<$ 16.000 m	Propagation normale de jour. Hauteur de réflexion vers 85 km	Renforcement brutal par D_1, peu d'action de D_2.	Le renforcement ne faiblit que peu à peu. L'action de D_1 se prolonge.	Le renforcement continue à faiblir. Retour à la normale.
$>\lambda$ 16.000 m	Propagation normale de jour. Hauteur de réflexion vers 70 km	A grande distance aucun renforcement, à petite parfois affaiblissement. Abaissement de la hauteur de réflexion.	Retour à la normale.	
λ = 2.000 m	Propagation normale de jour. Hauteur de réflexion vers 95 km	Absorption brutale par D_2.	Fin de l'action de D_2, renforcement par D_1.	Retour à la normale.

II. — LE SPECTRE RADIOELECTRIQUE DES PERTURBATIONS IONOSPHERIQUES A DEBUT BRUSQUE

1. Le problème du spectre radioélectrique des P.I.D.B.

Il est intéressant de savoir comment se comporte la propagation pendant une P.I.D.B. sur les ondes comprises entre celles qui donnent un évanouissement et celles qui donnent lieu à un renforcement.

A cet effet, nous avons étendu l'enregistrement des atmosphériques vers les ondes courtes, ce qui présentait des difficultés considérables, car il devient alors très difficile de protéger les enregistreurs

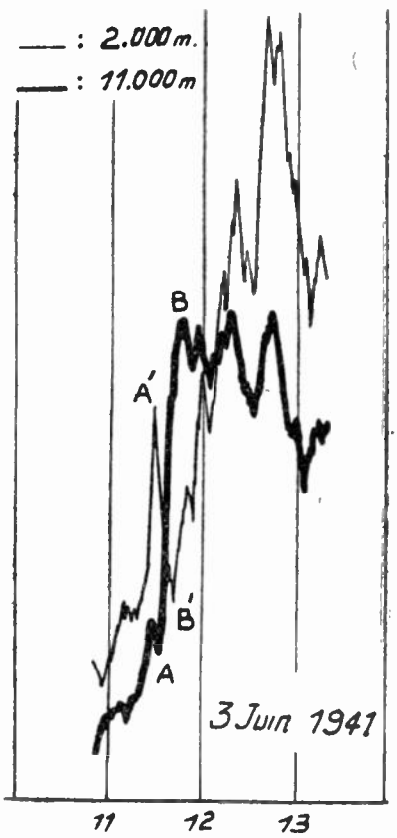


FIG. 4

contre les émissions et les brouillages industriels. En effet, le niveau des atmosphériques diminue régulièrement avec la longueur d'onde et, d'autre part, l'occupation des ondes par le trafic et le niveau des brouillages augmente. Nous avons cependant réussi des enregistrements sans brouillage sur les ondes suivantes : 7.500 m., 5.000 m., 2.000 m., 900 m., 200 m., 100 m., 30 m. et 20 m.

Le matériel disponible permettant au maximum, jusqu'ici, six enregistrements simultanés, et les ondes de 11.000 et 25.000 m. étant toujours gardées comme ondes de base, il était possible de disposer seulement de quatre ondes plus courtes.

Au cours du mois de juin 1941 s'est présentée une importante série de P.I.D.B. qui ont fourni l'occasion cherchée d'étude du spectre. Les longueurs d'onde des enregistreurs étaient alors les suivantes : 25.000 m., 11.000 m., 7.500 m., 2.000 m., 100 m., 20 m.

Voici les résultats obtenus.

2. Quelques exemples.

Parmi les P.I.D.B. de cette période, certaines m'ont fourni l'occasion d'une observation directe, ce qui facilite beaucoup la comparaison des courbes dont le déroulement est assez lent et où les phénomènes un peu rapides se dessinent assez mal. L'observation m'a, en particulier, permis de constater, d'une manière indubitable, le synchronisme de la montée de la plume sur une onde et de la descente sur d'autres ondes.

Exemple du 3 juin 1941.

Le phénomène principal est la montée AB sur 11.000 m. correspondant à une descente A' B' sur 2.000 m. (Fig. 4.).

Il a duré environ douze minutes. Après B, la courbe se stabilise sur 11.000 m. en ondulant autour du niveau moyen atteint en B ; sur 2.000 m., au contraire, la courbe s'élève rapidement à partir de B' en quatre montées successives.

Exemples du 6 juin 1941.

Les deux exemples de ce jour rentrent dans des catégories opposées. La première (fig. 5) présente, à 9 h. 55, un renforcement brutal et simultané sur 11.000 m. et 2.000 m. Sur 2.000 m., le retour au niveau primitif a lieu au bout de vingt minutes et est rapide. Cependant, sur 11.000 m., le retour au régime non perturbé est plus lent et très progressif.

La fig. 6 a trait à la seconde perturbation de la journée qui débute à 16 h. 20. C'est l'une des perturbations qui ont été suivies directement. La première phase, en A B, comporte la montée brusque sur

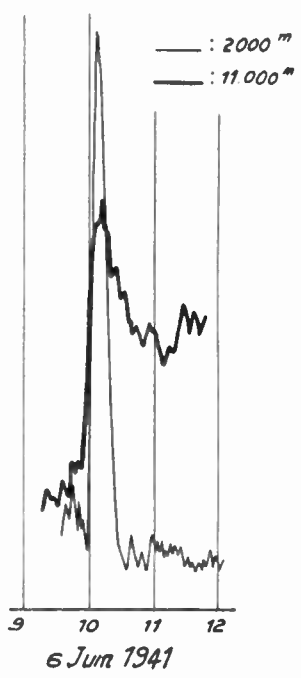


FIG. 5

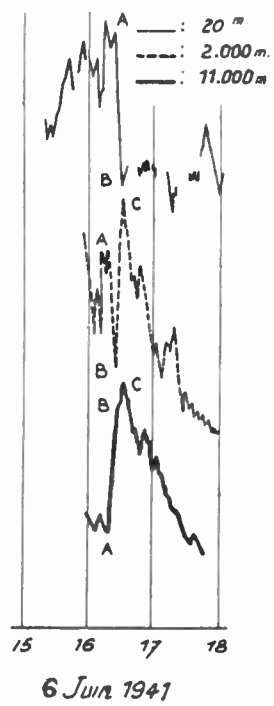


FIG. 6

11.000 m. et la descente aussi brusque, par absence d'atmosphériques, sur 2.000 m. et sur 20 m.

Jusque-là on pouvait considérer que 2.000 m. rentrait, pour cette perturbation, dans la catégorie des ondes qui subissent l'évanouissement. Mais aussitôt après B, la courbe monte brutalement sur 2.000 m., au point de dépasser le niveau de départ.

Après avoir atteint le maximum en C, les courbes sur 11.000 m. et sur 2.000 m. reviennent peu à peu à l'état non perturbé, mais 11.000 m. progressivement et 2.000 m. par à-coups.

Cependant sur 20 m. la courbe reste basse entre B et D, trois montées verticales dans cet intervalle correspondant à trois brèves séries d'impulsions qui ne sont probablement pas des atmosphériques (elles ne sont pas reproduites sur la figure 6).

Exemple du 9 juin.

La perturbation a été suivie par l'observation directe. Pour plus de clarté dans l'exposé de son histoire, la figure 7 donne l'aspect complet de la perturbation, et la figure 8 seulement l'aspect de la première partie jusqu'en C.

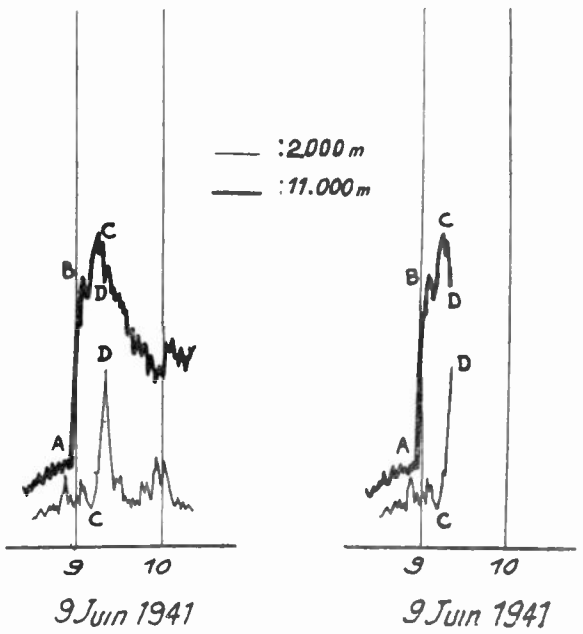


FIG. 7

FIG. 8

Première phase :

A 9 h. 05, montée brusque en A B sur 11.000 m., tandis que sur 2.000 m. les courbes, très basses auparavant, tendent vers zéro.

Deuxième phase :

Descente brusque en C D sur 25.000 m., 11.000 m. et 7.500 m. par absence totale d'atmosphériques pendant trente secondes environ. Au même instant, montée raide sur 2.000 m.

Troisième phase :

Aussitôt après la précédente, les atmosphériques reprennent sur les ondes très longues et cessent presque totalement sur 2.000 m.

3. Critique des résultats.

Les perturbations ionosphériques de juin-juillet 1941 ont pour origine des éruptions chromosphériques du soleil. Le fait a été vérifié directement pour plusieurs d'entre elles par l'Observatoire de Meudon qui a constaté l'existence de puissantes éruptions (intensités 2 ou 3). A plusieurs reprises, les observations de Meudon ont eu lieu après alerte donnée par téléphone, dès que l'enregistrement des atmosphériques permettait de reconnaître le caractère habituel de la perturbation.

Les enregistrements en cours ont permis de faire pour la première fois une étude du spectre des atmosphériques, au cours d'une perturbation déclenchée par une éruption solaire.

Sur les ondes courtes (100 m. et 20 m.), il arrive fréquemment que les atmosphériques soient trop peu nombreux pour que leur variation soit observable au moment de la perturbation. Nous avons cependant pu observer des exemples d'*évanouissements* des atmosphériques sur ondes courtes, au moment même où ils étaient *renforcés* sur ondes longues.

L'onde de 2.000 m. est une onde de transition entre les ondes renforcées et les ondes absorbées. Tantôt elle est renforcée comme l'onde de 11.000 m., mais la durée de ce renforcement n'excède pas celle de l'évanouissement des ondes courtes (vingt-quatre minutes) et la fin en est rapide et non progressive. Tantôt le phénomène commence par un évanouissement sur 2.000 m. très rapidement remplacé par un renforcement.

A côté du phénomène principal, apparaissent des phénomènes accessoires. Mais, s'ils sont accessoires du fait de leur durée restreinte, ils sont loin d'être qualitativement négligeables. Celui qui mérite le plus d'être mis en évidence est l'existence d'évanouissements d'environ vingt secondes sur ondes longues ou très longues (11.000 m. et 25.000 m.) accompagnés d'un renforcement synchrone et de même durée : brève sur ondes moyennes (2.000 m.) et peut-être (ce dernier point reste douteux) sur ondes courtes.

Nous renvoyons par ailleurs aux conclusions du chapitre premier, relatives à une hypothèse sur la structure de la région D anormale.

III. — LES PERTURBATIONS IONOSPHERIQUES A DEBUT BRUSQUE (P.I.D.B.) DE FEVRIER 1946

La première grande manifestation d'activité du nouveau cycle solaire undécennal est apparue brusquement, après trois ans de calme presque complet, aux derniers jours de janvier 1946. Des taches solaires d'une très grande activité et de formation récente sont apparues au bord Est du disque, les 29 et 30 janvier. Le 31 janvier est apparue leur première conséquence radioélectrique sous la forme d'un renforcement brusque des ondes longues et d'un évanouissement des ondes courtes. Ce fut le début d'une série ininterrompue qui se déroula

***

jusqu'au 14 février. Elle a été décrite succinctement dans une note des Comptes Rendus à l'Académie des Sciences (1). Nous nous proposons ici de donner quelques détails supplémentaires (2).

Les installations d'enregistrement ont été complétées depuis le dernier cycle solaire. Elles comportaient en février 1946 les dispositifs suivants :

a) Enregistrement du niveau moyen des parasites atmosphériques sur les longueurs d'onde suivantes : 24.000 m., 11.000 m., 5.000 m., 2.000 m. et 150 m. au Laboratoire National, à Bagneux. Sur 11.000 m., (l'onde principale) fonctionnaient quatre ensembles indépendants dont plusieurs comportent deux enregistrements, l'un sur radiocinémographe, l'autre sur galvanomètre amorti (balistègre). Il était ainsi possible d'obtenir des courbes d'amplifications différentes, et d'autre part de se protéger partiellement contre les brouillages (en décalant légèrement les récepteurs de part et d'autre de 11.000 m.).

b) Enregistrement des atmosphériques à Poitiers et à Rabat sur l'onde de 11.000 m. ;

c) Enregistrement du champ de l'émetteur de radiodiffusion de Limoges sur 463 m. ;

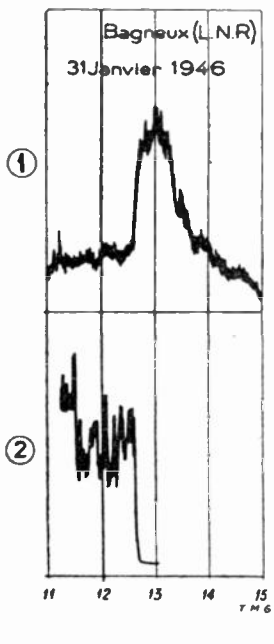


FIG. 9
1) *Atmosphériques sur 11.000 mètres. Renforcement à 1240 T. M. G.*
2) *Champ Genève sur 48,66 mètres. Evanouissement total à 1240 T.M.G. Fin de l'émission à 1300 T.M.G.*

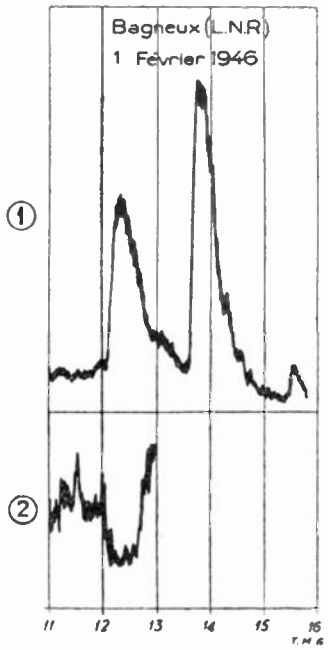


FIG. 10
1) *Atmosphériques sur 11.000 mètres. Renforcements à 1205 et 1335 T.M.G.*
2) *Champ Genève sur 48,66 mètres. Evanouissement partiel à 1205 T.M.G. Fin de l'émission à 13000 T.M.G.*

FIG. 9. — 31 *janvier* 1946. — Remarquer le synchronisme du renforcement d'atmosphériques (1) et de l'évanouissement de Genève (2). L'émission de Genève cesse à 13 h., c'est pourquoi la courbe 2 ne donne que le début de l'évanouissement.

FIG. 10. — 1er *février* 1946. — L'émission de Genève (2) s'arrête à 13 h. Le premier renforcement paraît débuter quelques minutes à peine après l'évanouissement. Remarquer la netteté des deux renforcements.

(1) C. R. Ac. Sc., 222, séance du 25 février 1946, p. 597.

(2) Depuis la rédaction de cet article nous avons eu connaissance d'un article de Sir Edward Appleton et de J. S. Hey paru dans *Phil. Mag., loc. cit.*, intitulé « Solar radio noise » et consacré au même mois de février 1946 et où les auteurs exposent surtout les observations de bruits radioélectriques solaires et montrent en particulier le synchronisme avec les P.I.D.B. en utilisant entre autres les indications que nous avons données dans la note précitée à l'Académie des Sciences.

d) Enregistrement du champ d'émissions sur ondes décamétriques (principalement le champ de la station de radiodiffusion de Genève sur 48 m. 66). Les enregistrements du champ de stations sur ondes décamétriques étaient limités à leurs heures de fonctionnement, tandis que l'enregistrement du champ

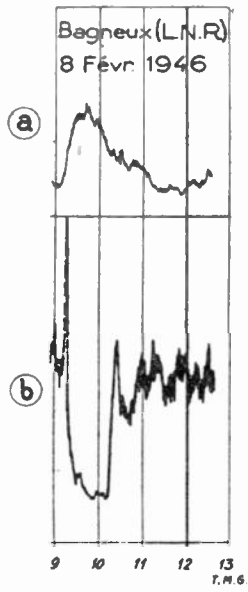


FIG. 11
a) *Atmosphériques 11.000 mètres.*
b) *Champ Genève 48,66 mètres.*

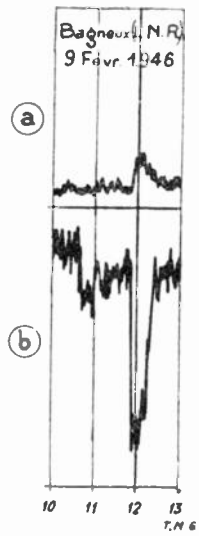


FIG. 12
a) *Atmosphériques 11.000 mètres.*
b) *Champ Genève 48,66 mètres.*

FIG. 11. — 8 *février* 1946. — Cet exemple est surtout remarquable par la courbe du champ de Genève (b): affaiblissement considérable précédé par un renforcement brutal d'une durée au plus égale à quelques secondes (la plume n'a pas eu le temps d'inscrire un trait continu dans la montée). Il faut sans doute voir là un exemple de ces sifflements qu'on observe parfois au début d'un évanouissement brusque. Ils sont attribuables, selon toute vraisemblance, à un bruit radioélectrique émis par le soleil. (Voir APPLETON, *Phil. Mag., loc. cit.*). L'émission radioélectrique solaire se poursuivrait pendant la perturbation, mais cesserait d'être perceptible sur les ondes décamétriques, parce qu'elle serait arrêtée par l'écran que forme presque immédiatement la région D anormale.

FIG. 12. — 9 *février* 1946. — Synchronisme entre l'affaiblissement très vigoureux (b) et le renforcement relativement faible.

des atmosphériques était poursuivi en permanence. Les enregistrements du champ de Genève, dont il va être question ci-après, étaient assurés sur un balistègre à grande constante de temps (environ cent secondes) identique à ceux utilisés pour l'enregistrement des atmosphériques. Ces appareils ont été décrits dans *La Météorologie* et dans les *Annales des Télécommunications* (3). C'est la première fois qu'on utilise au même lieu l'enregistrement des atmosphériques sur ondes myriamétriques pour la détection des renforcements brusques, et l'enregistrement du champ d'émetteurs sur ondes décamétriques pour les évanouissements et les affaiblissements brusques. Les figures reproduites ci-après montreront mieux qu'un discours à quel point cette

(3) F. CARBENAY, *La Météorologie*, n° 1, janv.-mars 1946, p. 34. « Enregistrements statistiques des phénomènes naturels rapidement variables. Application aux atmosphériques. »
F. CARBENAY, *Annales des Télécommunications*, II, 1946, p. 117. « L'enregistrement statistique des atmosphériques et l'enregistrement du champ des émetteurs radioélectriques. »

Date	Renforcements 11.000 mètres — Heures T.M.G. Début	Max.	Fin	Importance	Lieu *	Evanouiss. d'O.C. constatés à B = Bagneux V = Villecresnes N = Noiseau M = O.N.M.
Janv. 31.	12,40	13,05	13,45	5	B.P.	B.
Fév. 1er.	12,06	12,23	12,55	5	B.	B.
	13,37	13,50	14,30	6	B.P.	
2..	09,10	Pas de renforcement				B.V.N.M.
3..	12,50	13,08	13,30	3	B.	B.
	15,46	15,59	16,40	3	B.	
4..	12,59	13,12	13,45	1	B.	
5..	11,44	11,48	12,30	1	B.	B.
	15,10	15,22	16,00	1	B.	
6..	08,45	09,01	09,50	5	B.	
	13,52	14,03	15,00	2	B.	
7..	12,35	12,50	13,15	1	B.P.	B.
8..	09,10	09,40	10,30	2	B.	B.
	12,44	12,48	13,25	1	B.P.R.	
	13.30	13,45	14,15	2	B.P.R.	
9..	11,50	12,05	12,20	1	B.	B.V.
10.	10,08	10,17	xxx	2	B.P.R.	B.
	12,30	12,45	13.30	2	B.P.R.	B.
	14,31	14,40	15,10	2	B.P.R.	
11.	10,32	10,50	11,30	2	B.	B.V.N.
12.	11,50	12,00	xxxx	5	B.R.P.	B.V.R.
	12,15	13,35	xxxx	6	B.R.P.	B.V.R.
	13,14	13,17	14,00	4	B.	R.
	14,52	15,10	16,10	3	B.R.	
13.	09,02	09,10	09,30	1	B.R.	
	11,35	11,43	12,30	4	B.R.P.	B.
	15,17	15,37	16,50	6	B.R.P.	
14.	11,52	12,06	12,50	2	B.P.	B.
17.	12,00	12,05	12,15	1	B.	B.
Mars						
5..	11,30	11,40	12,30	6	B.P.R.	B.V.N.
6..	08,40	08,45	09,00	3	B.P.	B.V.N.M.
	10,15	10,25	10,45	1	B.P.	
12.	10,08	10,15	10,25	2	B.P.R.	B.N.M.
14.	15,10	15,17	15,55	4	B.R.	
18.	12,08	12,14	12,45	4	B.P.R.	B.
20.	14,45	14,55	15,20	3	B.P.	
21.	13,08	13,13	13,40	2	B.	
24.	15,50	16,00	16,45	5	B.P.R.	B.
28.	13,40	13,48	14,15	1	B.	

* B = Bagneux, P = Poitiers, R = Rabat.

association d'enregistrements est précieuse pour la recherche des P.I.D.B. et pour leur discrimination d'avec les perturbations qui ne sont que des brouillages, ou qui sont dues non à l'ionosphère, mais aux orages eux-mêmes.

Rappelons pour mémoire que, dans une P.I.D.B., les atmosphériques ne jouent qu'un rôle d'intermédiaires et d'émetteurs auxiliaires chargés de signaler les modifications de l'ionosphère. Les renforcements sur 11.000 m. ne sont pas dus à une augmentation du nombre d'atmosphériques à leur source, mais à une amélioration de leur propagation à grande distance. Il est important de faire ce rappel au moment où vient d'être signalée (1) l'émission de parasites cosmiques d'origine solaire sur ondes décamétriques et centimétriques, par les éruptions chromosphériques.

Ce qui caractérise les P.I.D.B. de février 1946, c'est la régularité avec laquelle elles se sont succédé tous les jours, du 31 janvier au 14 février. Une telle persistance n'avait jamais été constatée,

(1) E. V. Appleton, *Nature*. 156. 1945, p. 534.

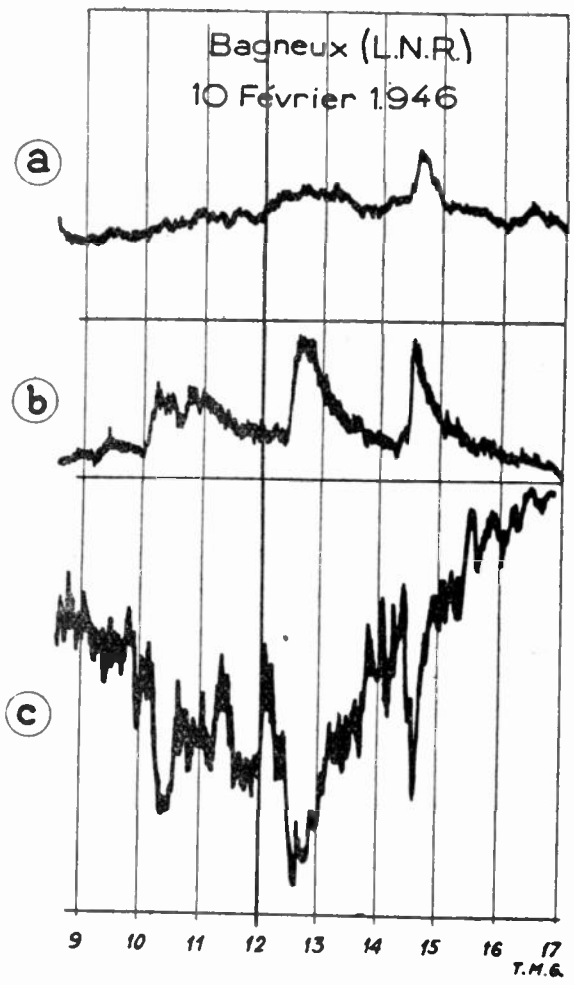


Fig. 13
a) *Atmosphériques 24.000 mètres*
b) *Atmosphériques 11.000 mètres*
c) *Champ Genève 48,66 mètres*

Fig. 13. — *10 février* 1946. — Le 10 février est un dimanche et l'émission de Genève (c) a duré jusqu'à 17 h., c'est ce qui a permis d'avoir l'enregistrement comparé de trois renforcements et de trois affaiblissements. Les renforcements ont une forme simple et classique, les affaiblissements sont beaucoup plus complexes. D'autre part, l'onde de 24.000 m.(a) est insensible aux deux premiers renforcements, mais légèrement sensible au troisième (b) atmosphériques sur 11.000 m.

même aux périodes les plus actives du cycle solaire précédent (années 1933-1944). Cette activité est d'autant plus frappante qu'elle succède à une très longue période de grand calme, la dernière série de P.I.D.B. antérieures s'étant passée du 17 au 24 avril 1943. Depuis, il n'y a eu que quelques P.I.D.B. isolées. Le retour de la tache solaire de fin janvier sur le bord Est du disque, le 25 février, n'a été accompagné d'aucune P.I.D.B. Comme le montre le tableau ci-contre entre le 14 février et le 12 mars il n'a été constaté que trois P.I.D.B., le 17 février, le 5 et le 6 mars. Il faut voir là un nouvel exemple en faveur du fait signalé par M. d'Azambuja que les éruptions chromosphériques se développent de préférence au voisinage de taches de formation récente. Dans l'ensemble des P.I.D.B. signalées dans le tableau ci-contre aucun renforcement ni aucun évanouissement n'a été constaté sur les courbes d'atmosphériques relatives aux longueurs d'onde 5.000 m. et 2.000 m.

La recrudescence si brutale de l'activité solaire a été l'occasion de développer le contact avec les

exploitants de la radioélectricité. Le Laboratoire National a fait paraître à cette occasion quelques notes rapides distribuées sans retard aux exploitants des liaisons radio. Cette liaison présentera le double avantage de renseigner les exploitants dans un délai court et de fournir au Laboratoire National une documentation sur les perturbations subies par le trafic radioélectrique.

Voici maintenant quelques reproductions (fig. 9 à 16) commentées des enregistrements les plus intéressants de cette période.

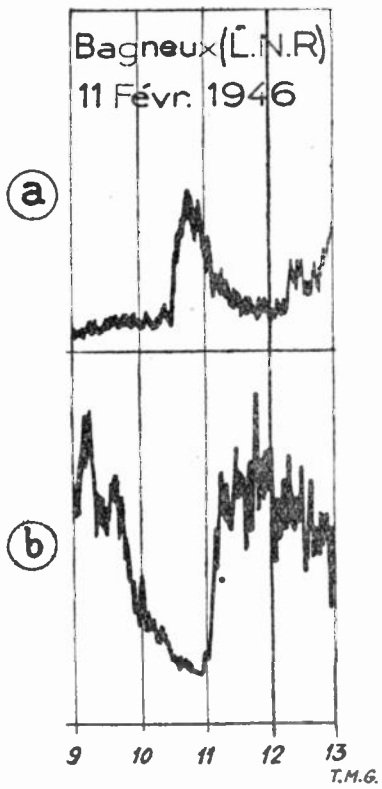


FIG. 14
a) *Atmosphériques 11.000 mètres*
b) *Champ Genève 48,66*

FIG. 14. — 11 *fév.* 1946. — Il y a une correspondance évidente entre le renforcement (a) et l'affaiblissement (b), mais il y a une différence importante, Genève s'affaiblit plus de trois quarts d'heure avant le début du renforcement. L'affaiblissement est assez progressif et le retour au champ normal est au contraire brutal (comme il a été le 8 février).

FIG. 15. — 12 *fév.* 1946. — Renforcements les plus importants de la série, enregistrés à Bagneux (a) et à Rabat (b) entre 12 h. 00 et 14 h. 00. Un grand maximum semble produit par l'accumulation de trois renforcements séparés. Il sera intéressant de vérifier ultérieurement s'il n'y a pas eu trois éruptions chromosphériques différentes. Le renforcement de 14 h. 52 est beaucoup plus brutal à Rabat qu'à Bagneux.

FIG. 16. — 13 *fév.* 1946. — Comme la veille, comparaison des renforcements de Bagneux (a) et de Rabat (b). Sur 24.000 m., exemple très net d'un affaiblissement brusque (c). Cette diminution sur les longueurs d'onde supérieures à 16.000 m. sous l'influence d'une éruption chromosphérique a été signalée par K. C. BUDDEN, J. A. RATCLIFFE et M. V. WILKES (Proc. Roy. Soc., A 171, 1939, p. 188) au cours de mesures, à Cambridge, du champ de Rugby sur 17.500 m.

Les trois renforcements ont une amplitude différente, le premier étant le plus faible et le dernier le plus vigoureux. Cela n'est peut-être pas attribuable à l'intensité de la perturbation solaire elle-même, mais à la variation de l'angle zénithal au-dessus du point de réflexion des ondes d'atmosphériques sur l'ionosphère. Cela expliquerait aussi pour quelle raison les P.I.D.B. sont plus nombreuses au cours de cette série aux environs de midi qu'aux autres heures. Il n'y a aucune raison pour que les perturbations de la chromosphère solaire accusent une variation diurne terrestre.

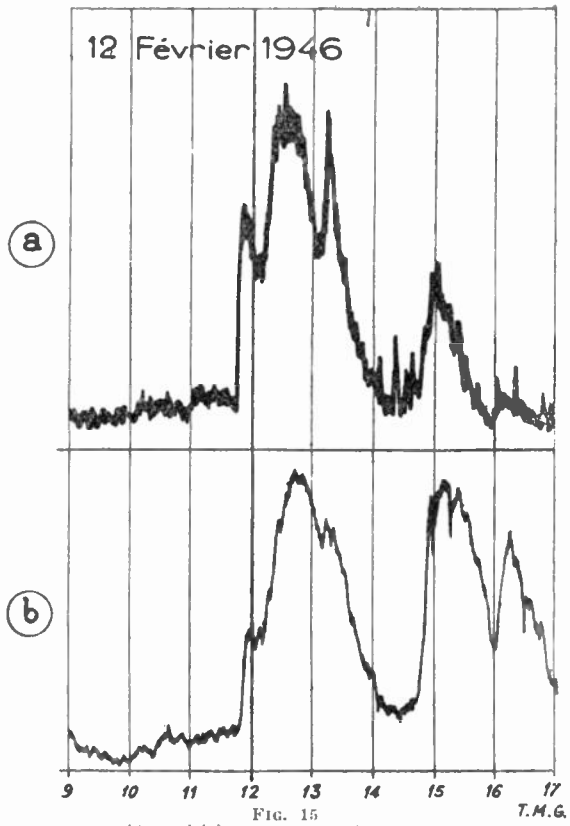


FIG. 15
a) *Atmosphériques 11.000 mètres. Bagneux*
b) *Atmosphériques 11.000 mètres. Rabat*

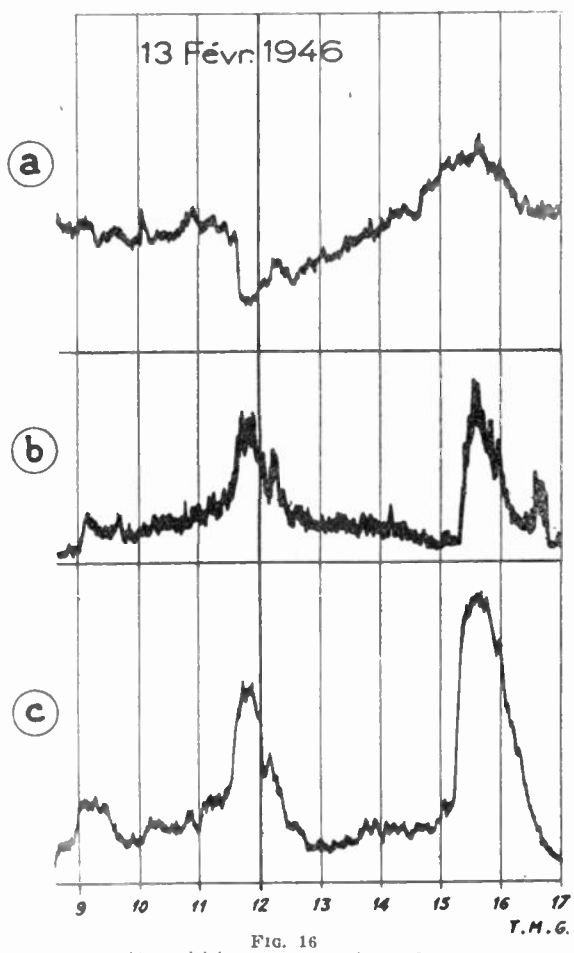


FIG. 16
a) *Atmosphériques 24.000 mètres. Bagneux*
b) *Atmosphériques 11.000 mètres. Bagneux*
c) *Atmosphériques 11.000 mètres. Rabat*

IV. — NOUVEAUX RESULTATS RELATIFS AU SPECTRE DES PERTURBATIONS IONOSPHERIQUES A DEBUT BRUSQUE

Dans le chapitre premier, nous avons signalé, décrit et commenté quelques exemples du spectre des P.I.D.B. Nous voulons signaler ici quelques nouveaux cas particuliers d'un intérêt remarquable.

1° Répartition des renforcements et des évanouissements entre les ondes décamétriques et les ondes myriamétriques.

Nous commenterons ici les deux exemples du 17 juin et du 29 octobre 1945. Ils se trouvent l'un et l'autre isolés au cours d'une année calme qui suivait immédiatement le minimum de l'activité undécennale. Ils sont des cas exceptionnels de la répartition des renforcements et des évanouissements dans le spectre radioélectrique. Ils n'en sont pas moins d'un puissant intérêt.

Exemple du 17 juin 1945 (fig. 17).

La figure qui donne un choix des courbes recueillies est suffisamment éloquente à elle seule. Le renforcement est d'une ampleur et d'une simplicité extrêmes. La similitude des courbes de 11.000 m. à Bagneux (b) et à Poitiers (c) est frappante. La courbe de 24.000 m. (a) est restée indifférente, mais le renforcement est très bien marqué sur 5.000 m. (d) et sur 2.000 m. (e).

Or, fait inattendu, aucun évanouissement n'a été constaté sur les ondes décamétriques, ni en France, ni en Grande-Bretagne. Par contre, des renseignements rétrospectifs nous ont appris qu'à la même minute, des évanouissements ont été observés à Washington. Nous n'avons pas de renseignements sur la chromosphère solaire ce jour-là.

Exemple du 29 octobre 1945.

Il s'est produit ce jour-là une perturbation à début brusque, qui a présenté des caractères très différents de ceux que l'on constate habituellement sur les courbes d'atmosphériques. Voici les principaux phénomènes observés à cette occasion :

L'observation de la chromosphère solaire par l'Observatoire de Meudon a commencé à 10 h. 40. A cette heure, l'éruption était déjà en plein développement.

Des évanouissements brusques sur ondes décamétriques sont signalés près de Paris, à Noiseau (Service de la T.S.F. des P.T.T.) et à Villecresnes (Compagnie Radio-France) : à Noiseau, évanouissement complet entre 10 h. 25 et 11 heures sur les circuits :

Bamako-Dakar, 15 Mc/s ;
Hanoï-Saïgon, 18 Mc/s ;
Maroc, 13 Mc/s, *Tananarive*, 18 Mc/s ;
Berlin, 7 Mc/s, *Moscou*, 10 Mc/s ;
Portugal, 13 Mc/s ;
Brentwood, 7 Mc/s ; *Hicksville*, 10 Mc/s.

A Villecresnes, évanouissement entre 10 h. 20 et 10 h. 50 avec maximum à 10 h. 23 ;

Amérique du Sud, 20 Mc/s ;
Extrême-Orient, 16 à 17 Mc/s ;
Proche-Orient (Beyrouth), 16 à 17 Mc/s ;
Euroge (*Prague*), 7 Mc/s.

Les enregistrements d'atmosphériques indiquent une grande agitation comme le montre la figure ci-jointe.

1° Sur 11.000 m., à Bagneux (L.N.R.) (b), elle se traduit entre 10 h. 15 et 12 h. 30 par plusieurs crochets qui ne rappellent que de loin l'aspect habituel d'un renforcement brusque. On distingue quatre discontinuités principales, à 10 h. 15, 10 h. 30, 11 heures et 12 heures. Sur les mêmes ondes, à Poitiers (a), l'aspect est différent : on y relève surtout une montée brusque à 10 h. 22 et à 10 h. 59. Sur les ondes kilométriques on constate une crevasse entre deux montées brusques. Sur 5.000 m. (c), montée brusque à 10 h. 15, fond de la crevasse à 10 h. 30. Sur 2.000 m. on distingue surtout deux descentes brusques dues à un évanouissement assez court de l'ordre de la minute, le premier à 10 h. 20 et le second à 10 h. 50. Sur 24.000 m., il y a un léger renforcement à 10 h. 20 et un crochet à 11 h. 05.

L'agitation s'est renforcée à nouveau sur la courbe d'atmosphériques à 12 heures, sur tout sur 5.000 m. (d) Il ne semble pas qu'elle corresponde alors à des éva-

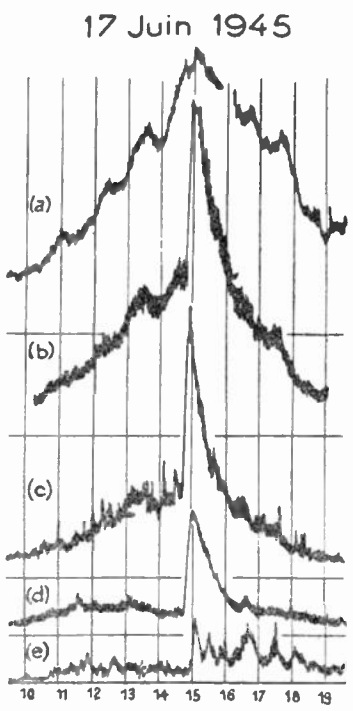


FIG. 17
a) *Atmosphériques 24.000 mètres. Bagneux.*
b) *Atmosphériques 11.000 mètres. Bagneux.*
c) *Atmosphériques 11.000 mètres. Poitiers.*
d) *Atmosphériques 5.000 mètres. Bagneux.*
e) *Atmosphériques 2.000 mètres. Bagneux.*

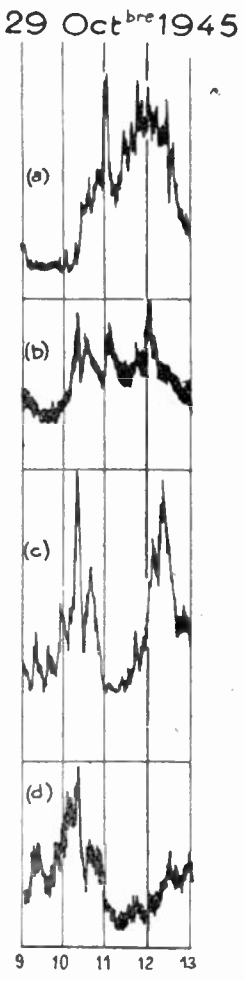


FIG. 18
a) *Atmosphériques 11.000 mètres. Poitiers.*
b) *Atmosphériques 10.000 mètres. Bagneux.*
c) *Atmosphériques 5.000 mètres. Bagneux.*
d) *Atmosphériques 2.000 mètres. Bagneux.*

nouissements importants. L'Institut de Physique du Globe (Observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt) signale de très faibles crochets sur H et D dans le même sens que la variation diurne.

Commentaire de ces deux exemples.

L'exemple de P.I.D.B. du 29 octobre 1945, décrit ci-dessus en détail est assez complexe, et par là-même riche en enseignements.

Cette perturbation à début brusque, dont le point culminant paraît placé vers 10 h. 23, s'est beaucoup plus manifestée par des évanouissements que par des renforcements. Il y a là un contraste marqué avec d'autres exemples et, en particulier, avec celui du 17 juin 1945. Le 29 octobre, non seulement les évanouissements sont généralisés sur ondes décamétriques, mais ils s'étendent aux ondes kilométriques, tandis que par opposition, les renforcements sont freinés sur l'onde de 11.000 m., ce qui est très rare. Inversement, le 17 juin, les renforcements ont un aspect quasi théorique non seulement sur 11.000 m., mais aussi sur 5.000 et 2.000 m., et à la même date, aucun évanouissement n'est signalé sur le trafic par ondes décamétriques, ni en France, ni en Grande-Bretagne. Il y a évidemment là une indication formelle sur la diversité des aspects que peut présenter la région D anormale. Les deux exemples précités donnent les caractères extrêmes. Ceux-ci peuvent être attribués à des différences d'altitudes de la région D anormale ; l'exemple du 17 juin correspondant à une altitude élevée et voisine de E

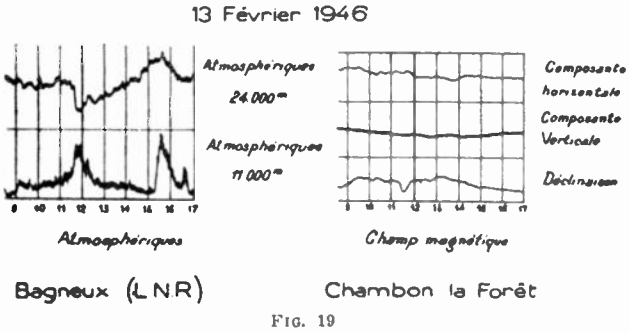


FIG. 19

l'exemple du 29 octobre correspondant au contraire à une altitude nettement plus basse.

2° Influence des éruptions chromosphériques sur les ondes myriamétriques.

Nous avons signalé jusqu'ici que les ondes myriamétriques plus longues que 16.000 m. étaient en général indifférentes aux éruptions chromosphériques et que, si elles réagissaient, c'était dans le sens d'un renforcement, et encore était-il bien moins marqué que sur les ondes plus courtes que 16.000 m. De temps à autre, quelques ondulations de la courbe sur 24.000 m. semblaient dénoter un affaiblissement provisoire de cette onde au moment d'une P.I.D.B. Cette dernière indication se trouvait d'ailleurs en accord avec les constatations faites à Cambridge, sur le champ de Rugby, par K. G. Budden, J. A. Ratcliffe et M. V. Wilkes (1). Le 13 février 1946, il y a eu sur 24.000 m. non pas seulement un affaiblissement provisoire, mais une diminution brusque du champ des atmosphériques. Coulomb et Selzer (2) ont signalé que cette P.I.D.B. du 13 février se comportait d'une manière spéciale vis-à-vis du magnétisme terrestre et que, non seulement, elle donnait pour la composante horizontale H un très beau crochet, mais que de plus, ce crochet était en

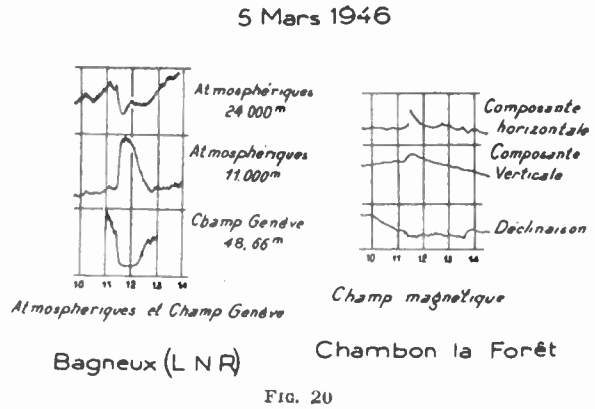


FIG. 20

sens inverse du sens habituel. Or, comme le montre la figure ci-jointe, nous avons retrouvé les mêmes phénomènes sur 24.000 m. le 5 mars 1946. On voit apparaître au même instant une diminution brutale du champ des atmosphériques sur 24.000 m., un renforcement brusque des atmosphériques sur 11.000 m. et un évanouissement brusque du champ de radiodiffusion de Genève sur 48 m. 66. Or, comme nous le signale l'Institut de Physique du Globe et comme le montre la figure ci-jointe, à ce phénomène correspond à nouveau un crochet de la composante horizontale H du champ magnétique terrestre et ce crochet une nouvelle fois, est en sens inverse, des crochets habituels.

Nous avons jusqu'ici expliqué l'indifférence relative des ondes de 24.000 m. aux éruptions chromosphériques en admettant que leurs réflexions se produisent à un niveau plus bas que celui de la région D anormale. Cette explication n'est plus valable pour les cas des 13 février et 5 mars 1946. Or, R. Jouaust a calculé à notre intention l'ordre de grandeur des épaisseurs de couches ionisées nécessaires pour provoquer une réflexion métallique sur les ondes de 11.000 m. et de 24.000 m. Il a trouvé qu'il fallait environ 800 m. d'épaisseur sur l'onde de 11.000 m. et 1.600 m. d'épaisseur pour l'onde de 24.000 m. Or, si l'épaisseur est comprise entre ces deux valeurs limites, en supposant qu'elle soit, par exemple, de 1.200 m., il y aura réflexion métallique pour l'onde de 11.000 m. et non pas pour l'onde de 24.000 m. Si celle-ci atteint le niveau de la couche ionisée de 1.200 m. d'épaisseur, elle la traversera en s'affaiblissant fortement à l'aller et au retour, ce qui expliquerait le phénomène que nous avons constaté.

On voit donc que l'étude des P.I.D.B. est loin d'avoir épuisé son intérêt et à quel point il importe de la poursuivre en l'étendant au plus large domaine possible des longueurs d'onde et en divulguant les résultats parmi les astronomes, les géophysiciens et les radiophysiciens.

(1) *Proc. Roy. Soc.*, A 171, 1939, p. 188.

(2) C. R. Ac. Sc., 222, 11 mars 1946, p. 599.

LES RECENTES THEORIES DE L'ANTENNE [1]

PAR

E. ROUBINE (2)

Agrégé de l'Université,

Ingénieur à la Compagnie française Thomson-Houston

B. — LA THEORIE DE STRATTON ET CHU

I. — Généralités.

Il a été dit plus haut que le premier problème a été celui des oscillations libres de l'ellipsoïde de révolution (Max Abraham 1898, Marcel Brillouin, 1904).

Plus tard, deux méthodes parentes furent proposées pour l'étude directe des oscillations libres du cylindre (Oseen, 1913, Hallen, 1930 ; voir page 36). On se trouve en présence de deux types d'approximations : l'ellipsoïde est une approximation géométrique du cylindre, objet toutefois d'un traitement rigoureux, tandis que les méthodes d'Oseen et Hallén se rapportent au cylindre lui-même, mais procèdent par approximation analytique.Or, l'expérience (Lindman, 1932) fit constater que cette dernière était moins bonne que la première, d'où un renouveau d'intérêt suscité par l'ellipsoïde. Les calculs ont été repris par Page et Adams (13) (14) pour les oscillations libres et pour les oscillations forcées sous l'action d'un champ incident, polarisé suivant l'axe de l'ellipsoïde (au sens des Radioélectriciens). C'est le cas de l'antenne réceptrice. Il a été également traité par Ryder (15). Stratton et Chu ont étudié l'antenne d'émission et nous voudrions donner ici un aperçu de leur méthode.

Le point le plus délicat, et partant le plus controversé, est celui des conditions d'alimentation et il importe de n'en pas masquer les difficultés. On se propose d'exciter symétriquement un ellipsoïde de révolution. On peut imaginer qu'une coupure équatoriale très étroite sépare la surface en deux demi-ellipsoïdes. Ceux-ci sont fermés par deux bases qu'on alimente en leurs centres par un coaxial comme l'indique la fig. 7. L'excitation est parfaitement symétrique. Une tension V_0 est ainsi appliquée entre les deux bords de la coupure, ce qui revient à créer un champ électrique :

$$E^a = -\frac{V_0}{h}$$

parallèle à l'axe et uniformément réparti sur la zone équatoriale découpée dans la surface de l'antenne. Cette zone sera dite zone d'alimentation ; h en est la largeur. D'un autre côté, si l'on observe que l'un des conducteurs du coaxial amène un courant sensiblement égal à celui qui repart dans le second, on peut dire que les deux bords de la coupure sont traversés par des courants dont l'intensité est pratiquement la même, ou encore que la distribution des

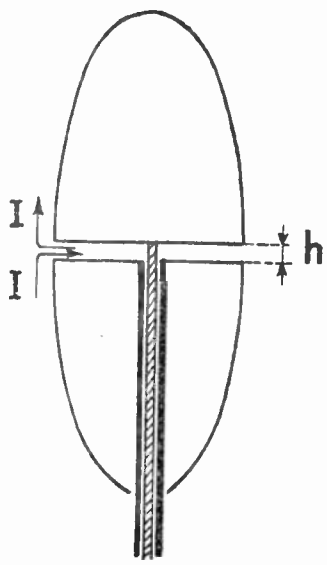


Fig. 7

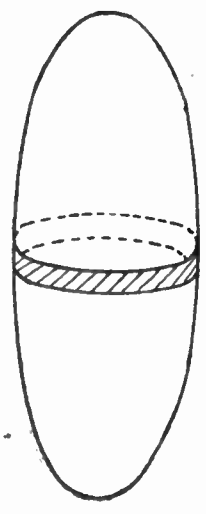


FIG. 8

courants reste continue de part et d'autre de la coupure. Il semble alors naturel d'admettre que tout se passe comme si l'ellipsoïde n'avait pas été coupé, d'où la continuité des courants, et qu'un champ électrique extérieur parallèle à l'axe soit uniformément appliqué sur la zone d'alimentation. C'est le procédé le plus commode pour poser les équations du problème. Il revient à négliger le rôle éventuel joué par le dispositif d'alimentation. Cette approximation, justifiable lorsqu'on se limite à des spéculations strictement mathématiques, est-elle légitime du point de vue physique ? Ainsi le traitement rigou-

(1) Voir O. E. janvier 1947.

reux de l'exemple de la fig. 7 exigerait qu'on tienne compte de la véritable ligne radiale constituée par les deux bases, entre le feeder et l'antenne proprement dite. Si celle-ci est assez mince pour que la propagation sur les bases soit négligée, il subsiste néanmoins une capacité d'autant plus grande que la coupure est plus étroite. A la limite, une coupure infiniment étroite conduit à une capacité infinie.

Un exemple concret nous a permis de constater l'importance d'un nouveau problème : la difficulté de définir une impédance d'entrée sans tenir compte de la forme et de la disposition des conducteurs dans la région d'alimentation. Le problème ne sera que signalé dans cette première étude. Il semble d'ailleurs n'avoir été abordé que depuis peu (3) (4) (5). Nous admettrons simplement la possibilité de faire dans chaque cas particulier les corrections nécessaires.

II. — L'antenne sphérique (17).

L'étude de l'antenne sphérique d'émission est la meilleure des façons de comprendre la méthode utilisée dans le cas général de l'antenne ellipsoïdale. On y fait appel à des fonctions élémentaires. Le point de départ des calculs est le même que celui des cavités sphériques, mais on se souviendra qu'il s'agit ici d'un problème *extérieur* de *régime forcé*.

1° *Expressions générales* :

On considère en coordonnées polaires, r, θ, φ la sphère parfaitement conductrice $r = R$. Sur une étroite zone $2\,\Delta\,\theta$, qui s'étend de part et d'autre de l'équateur $\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right)$ entre les parallèles $\frac{\pi}{2} - \Delta\,\theta$ et $\frac{\pi}{2} + \Delta\,\theta$, on applique un champ extérieur $\vec{E}^{(a)}$ réduit à la composante $E_\theta^{(a)}$ indépendante de la coordonnée φ.

Pour le calcul des champs en coordonnées sphériques, on pourra, par exemple, se reporter aux *Problèmes de propagations guidées*, de M. Louis de Broglie (Gauthier-Villars, 1941), page 49. On tiendra compte des unités adoptées ici et surtout du fait que toutes les grandeurs considérées dans les calculs ont une distribution de révolution autour de l'axe Oz $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$

Alors à toute fonction $U(r, \theta)$ satisfaisant à l'équation aux dérivées partielles (formule (26) *op. cit.*) :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\,\frac{\partial U}{\partial\theta}\right) + k^2 U = 0 \qquad (9)$$

on associe une solution *électrique* (formule (27) :

$$E_r = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + k^2 U = -\frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\,\frac{\partial U}{\partial\theta}\right) \qquad Hr = 0$$

$$E_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial^2 U}{\partial r\,\partial\theta} \qquad H_\theta = 0 \qquad (10)$$

$$E_\varphi = 0 \qquad H_\varphi = -\frac{j\omega\varepsilon}{r}\frac{\partial U}{\partial\theta}$$

La solution magnétique est écartée ; elle ne permet pas de satisfaire aux conditions frontières

Par séparation des variables :

$$U(r, \theta) = Z(r)\,T(\theta)$$

l'équation (9) se décompose en :

$$\frac{1}{\sin\theta}\,[\sin\theta\,T'(\theta)]' + \nu(\nu+1)\,T(\theta) = 0 \qquad (11)$$

et :

$$Z''(r) + \left[k^2 - \frac{\nu(\nu+1)}{r^2}\right] Z(r) = 0 \qquad (12)$$

où la constante de séparation est écrite sous la forme :

$$\nu(\nu+1)$$

La première équation est l'équation de Legendre d'ordre ν. Les seules solutions régulières sur l'axe $\theta = 0$, $\theta = \pi$ sont les polynômes de Legendre $P_n(\cos\theta)$. Par conséquent on doit se limiter aux valeurs entières n de la constante ν.

La seconde équation se ramène à celle de Bessel. On prendra la solution :

$$Z(r) = \sqrt{r}\;\; H^{(2)}_{n+\frac{1}{2}}(kr) \qquad (13)$$

où la fonction de Hankel de seconde espèce est mieux adaptée à la nature « extérieure » du problème que les autres fonctions de Bessel

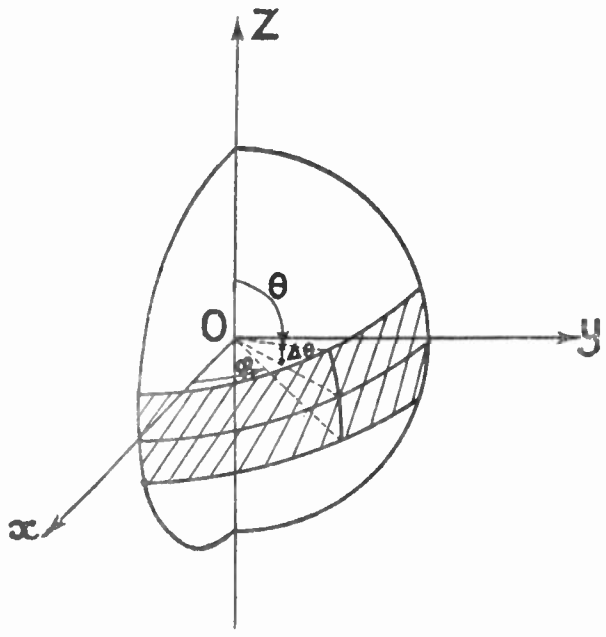


FIG. 9

Par conséquent l'équation (9) admet des solutions particulières à variables séparées de la forme :

$$U(r, \theta) = \sqrt{r}\;\; H^{(2)}_{n+\frac{1}{2}}(kr)\,P_n(\cos\theta) \qquad (14)$$

Pour le calcul des champs notons qu'on a alors :

$$E_r = \frac{n(n+1)}{r^2}\,U$$

et qu'en outre :

$$\frac{d\,P_n(\cos\theta)}{d\,\theta} = -\,P_n^1(\cos\theta)$$

où $P_n^1(\cos\theta)$ est un polynôme de Legendre associé (*).

(*) (30), p. 323.

2° *Calcul des champs.*

La constante entière $n = 1, 2, 3, \ldots$ met à notre disposition une infinité discrète de solutions particulières. Toute combinaison linéaire, c'est-à-dire ici toute série de ces solutions, est une solution possible du problème. Formons donc les séries suivantes :

$$E_r = \frac{1}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n n(n+1) Z_n(r) P_n(\cos\theta)$$

$$E_\theta = -\frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} A_n Z_n'(r) P_n(\cos\theta) \qquad (15)$$

$$H_\varphi = \frac{j\omega\varepsilon}{r} \sum_{n=1}^{\infty} A_n Z_n(r) P_n^1(\cos\theta)$$

Les autres composantes sont nulles :

$$E_\varphi = H_r = H_\theta = 0.$$

On a posé pour abréger :

$$Z_n(r) = \sqrt{r}\ H^{(2)}_{n+\frac{1}{2}}(kr).$$

Les coefficients A_n doivent être ajustés de manière à satisfaire à la condition frontière : champ électrique total $\vec{E} + \vec{E}^{(a)}$ normal à la sphère $r = R$. Il suffit donc d'écrire

$$E_\theta + E_\theta^{(a)} = 0 \qquad (16)$$

pour $r = R$. L'expression de E_θ dans (15) suggère que l'on développe le champ appliqué en une série de polynômes de Legendre associés :

$$P_n^1(\cos\theta) \ (*).$$

$$E_\theta^{(a)} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n P_n^1(\cos\theta)$$

avec :

$$B_n = \frac{2n+1}{2n(n+1)} \int_0^{\pi} E_\theta^{(a)} P_n^1(\cos\theta) \sin\theta\, d\theta$$

Il suffira alors d'écrire :

$$A_n = \frac{R}{Z_n'(R)} B_n \qquad (17)$$

pour satisfaire à (16). Les coefficients A sont ainsi déterminés.

Calcul de B_n :

$E_\theta^{(a)}$ est nul en dehors de l'intervalle très étroit $\left(\frac{\pi}{2} - \Delta\theta, \frac{\pi}{2} + \Delta\theta\right)$. On a donc sensiblement :

$$B_n \simeq \frac{2n+1}{2n(n+1)} P_n^1(0) \int_{\frac{\pi}{2}-\Delta\theta}^{\frac{\pi}{2}+\Delta\theta} E_\theta^{(a)}\, d\theta$$

L'intégrale représente, au facteur $-R$ près, la tension appliquée V_0. D'autre part $P_n^1(0)$ n'est différent de zéro que pour n impair auquel cas :

$$P^1_{2p+1}(0) = (-1)^p \frac{1.3.5\ldots(2p+1)}{2.4.6\ldots.2p} \quad [P^1(0) = 1]$$

D'où en définitive :

$$B_{2p+1} = -(-1)^p \frac{4p+3}{2} \frac{1.3.5\ldots(2p-1)}{2.4.6\ldots(2p-2)} \frac{V_0}{R}$$

et par conséquent :

$$A_{2p+1} = -(-1)^p \frac{4p+3}{2} \frac{1.3.5\ldots.(2p-1)}{2.4.6\ldots(2p+2)} \frac{V_0}{Z'_{2p+1}(R)} \qquad (18)$$

$$A_{2p} = 0$$

D'où les champs en portant dans (15) (sous réserve de convergence).

Remarque. — Champs à grande distance : lorsque r est grand on obtient les expressions asymptotiques :

$$Z_n(r) \sim j^{n+1} \sqrt{\frac{2}{\pi k}}\ e^{-jkr}$$

$$Z_n'(r) \sim j^n \sqrt{\frac{2k}{\pi}}\ e^{-jkr}$$

d'où l'on déduit les champs à grande distance :

$$E_r = \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \frac{e^{-jkr}}{r^2} \sum_p (-1)^{p+1} A_{2p+1} (2p+1)(2p+2) P_{2p+1}(\cos\theta)$$

$$E_\theta = -j \sqrt{\frac{2k}{\pi}} \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_p (-1)^p A_{2p+1} P^1_{2p+1}(\cos\theta) \qquad (15)$$

$$H_\varphi = -j \sqrt{\frac{\varepsilon}{\eta}} \sqrt{\frac{2k}{\pi}} \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_p (-1)^p A_{2p+1} P^1_{2p+1}(\cos\theta)$$

E_r est négligeable devant E_θ et H_φ si $\frac{1}{r}$ est pris pour infiniment petit principal. On retrouve un résultat bien connu : $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont orthogonaux entre eux et à la direction de propagation ; ils sont en phase et dans un rapport constant $\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$.

L'expression de E_θ permettrait de déterminer le diagramme de rayonnement.

(*) **(30)**, p. 324.

3° *Calcul des courants* :

La distribution des courants se déduit immédiatement de la connaissance du champ magnétique à la surface de la sphère :

$$H_\varphi = \frac{j\,\omega\,\varepsilon}{R} \sum_n A_n\, Z_n(R)\, P_n^1(\cos\theta)$$

au moyen de la relation fondamentale (8).

$\vec{J}$ se réduit donc ici à la seule composante :

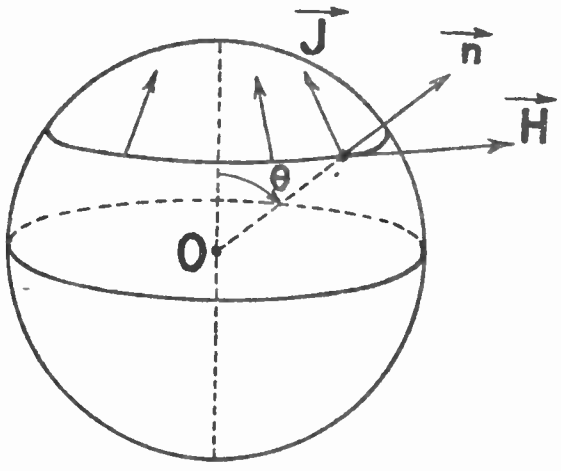


FIG. 10

$$J_\theta = -\frac{1}{4\pi} H_\varphi$$

L'intensité du courant qui traverse le parallèle 0 est le flux linéaire de $\vec{J}$ à travers ce parallèle :

$$I(0) = 2\pi R \sin 0\, J_\theta$$

ou :

$$I(\theta) = -\frac{1}{2} j\,\omega\,\varepsilon \sin 0 \sum_n A_n\, Z_n(R)\, P_n^1(\cos\theta)$$

En particulier, le courant d'entrée sera :

$$I_0 = I\left(\frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{2} j\,\omega\,\varepsilon \sum_n A_n\, Z_n(R)\, P_n^1(0)$$

ou en remplaçant A_n par l'expression :

$$-\frac{2n+1}{2n(n+1)} \frac{P_n^1(O)}{Z_n'(R)} V_0$$

$$I_0 = \frac{1}{2} j\,\omega\,\varepsilon\, V_0 \sum_n \frac{2n+1}{2n(n+1)} \frac{Z_n(R)}{Z_n'(R)} [P_n^1(O)]^2 \quad (19)$$

(n = impair).

4° *Calcul de l'admittance d'entrée* :

L'admittance d'entrée $Y_0 = \frac{1}{Z_0}$ est par définition le rapport $\frac{I_0}{V_0}$.

D'où, d'après (19) :

$$Y_0 = \frac{1}{2} j\,\omega\,\varepsilon \sum_n \frac{2n+1}{2n(n+1)} \frac{Z_n(R)}{Z_n'(R)} [P_n^1(o)]^2 \quad (20)$$

Y_0 est une somme de la forme :

$$Y_0 = Y_1 + Y_3 + Y_5 + \ldots.$$

Tout se passe comme si les admittances partielles :

$$Y_1,\ Y_3,\ Y_5,\ \ldots$$

étaient branchées en dérivation aux extrémités du feeder.

Signalons une difficulté d'ordre mathématique : l'hypothèse d'une zone d'alimentation infinitésimale entraîne la non-convergence de la série Y_0, ce qui est à rattacher à la discussion abordée plus haut. Cette hypothèse entraîne d'ailleurs que le champ appliqué est infini. Selon Stratton et Chu, si l'on admet que la zone d'alimentation est petite mais finie, les premiers termes Y_1, Y_3, ... sont peu altérés et la série devient convergente. La somme des premiers termes donnera une idée de l'admittance totale. Chacun de ces termes est complexe :

$$Y_n = g_n + j\,b_n$$

Il comprend une partie réelle g_n (conductance d'entrée) et une partie imaginaire b_n (susceptance d'entrée). Les pertes étant négligées, Y_n est une admittance partielle de rayonnement. (*Voir page* 33.)

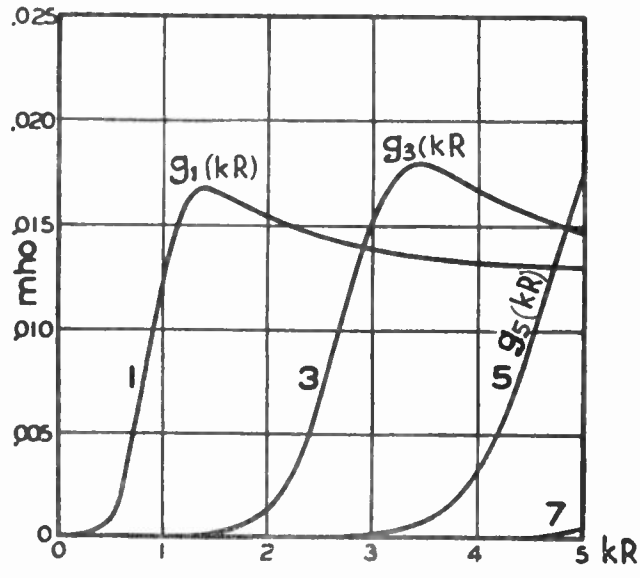


FIG. 11

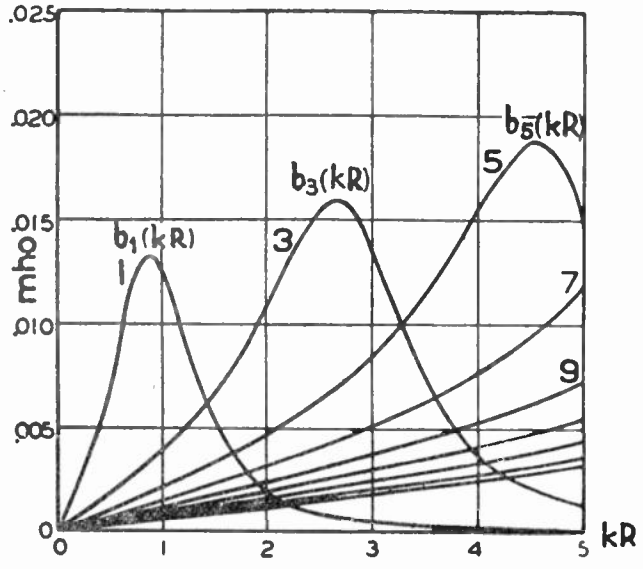


FIG. 11 *b*

On a reproduit, fig. 11, les courbes données par Stratton et Chu dans l'article cité (**17**). Les ordonnées représentent des ohms. En abscisses on a porté :

$$k\,R = \frac{\omega}{v}\,R.$$

Pour une sphère donnée, $k\,R$ est proportionnel à la fréquence ; pour une fréquence donnée, $k\,R$ est proportionnel au rayon de la sphère.

Les remarques suivantes peuvent être faites sur la figure 11.

a) Si $k\,R \ll n$ (basses fréquences ou petit rayon) : g_n est nul et b_n proportionnel à l'abscisse. L'admittance partielle Y_n se comporte donc comme une capacité pure.

b) Au voisinage de $k\,R = n$, conductance et susceptance passent par un maximum. On dit qu'il y a résonance.

c) Si $k\,R \gg n$ (hautes fréquences ou grand rayon) : g_n tend vers une limite finie et b_n décroît rapidement vers zéro. L'admittance se comporte donc comme une conductance pure.

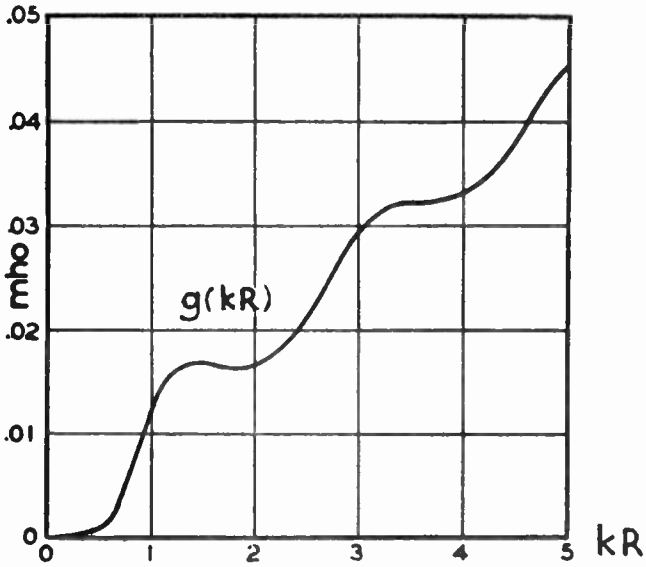


FIG. 12

La fig. 12 indique l'allure de la conductance totale. La courbe s'élève par paliers. L'antenne est à larges bandes. La courbe de la susceptance a une allure analogue. Il est à noter que le type d'antenne très large considéré ici conduit à des résultats très différents de ceux, plus familiers, qu'on obtient avec les antennes minces.

5° *Calcul de la puissance rayonnée* :

On a admis que toute la puissance fournie à l'antenne était rayonnée.

Par conséquent :

$$W = \frac{1}{2}\,V_0\,I_0 = \frac{1}{2}\,V_0^2\,Y_0\,{}^*$$

ou :

$$W = -\frac{1}{4}\,j\,\omega\,\varepsilon\,V_0^2 \sum_n \frac{2n+1}{2n(n+1)}\,\frac{Z_n^*(R)}{Z_n'^*(R)}\,[P_n^1(O)]^2$$

Un calcul simplifié a été présenté dans ce chapitre. Le calcul de Stratton et Chu est plus complet : il tient compte des pertes Joule dans la sphère.

III. — L'antenne ellipsoïdale (18) :

La méthode de calcul développée pour la sphère a pu être étendue à l'ellipsoïde de révolution allongé. Mais elle exige des moyens mathématiques dont l'exposition sortirait du cadre de cette étude. On se bornera à montrer comment s'obtiennent les équations du problème et on discutera les résultats.

1° *Coordonnées sphéroïdales* :

Les coordonnées sphéroïdales du point M de coordonnées cartésiennes x, y, z sont trois nombres ξ, η, φ tels qu'on ait :

$$\begin{aligned} x &= f\,\sqrt{(\xi^2-1)(1-\eta^2)}\cos\varphi \\ y &= f\,\sqrt{(\xi^2-1)(1-\eta^2)}\sin\varphi \\ z &= f\,\xi\,\eta \end{aligned} \qquad (21)$$

avec :

$$|\xi| \geqslant 1, \qquad |\eta| \leqslant 1, \qquad 0 \leqslant \varphi \leqslant 2\pi$$

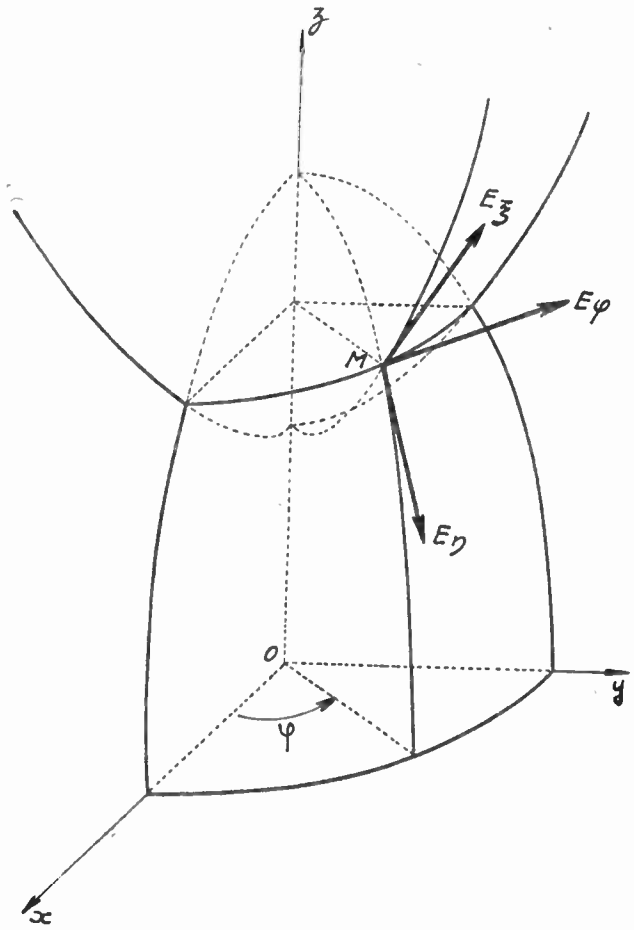


FIG. 13

Les surfaces coordonnées forment le système triple orthogonal constitué par :

a) La famille des ellipsoïdes de révolution autour de Oz homofocaux $\xi = C_{te}$. Les foyers sont les

points de cotes $\pm f$ sur l'axe des z. L'excentricité est donnée par $\frac{1}{|\xi|}$.

b) La famille des hyperboloïdes de révolution à deux nappes homofocaux $\eta = C^{te}$. Les foyers sont ceux des ellipsoïdes et l'excentricité est $\frac{1}{|\eta|}$;

c) La famille des demi-plans $y = x \operatorname{tg} \varphi$ d'arête Oz. Ainsi la surface de l'antenne est l'ellipsoïde $\xi = \xi_0$ et la zone d'alimentation y est définie par l'intervalle $-\Delta\eta \leqslant \eta \leqslant \Delta\eta$ avec φ quelconque.

L'élément linéaire :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

est calculé au moyen de (21) :

$$ds^2 = A^2 d\xi^2 + B^2 d\eta^2 + C^2 d\varphi^2$$

où :

$$\begin{aligned} A^2 &= f^2 \frac{\xi^2 - \eta^2}{\xi^2 - 1} \\ B^2 &= f^2 \frac{\xi^2 - \eta^2}{1 - \eta^2} \\ C^2 &= f^2 (\xi^2 - 1)(1 - \eta^2) \end{aligned} \qquad (22)$$

Tout vecteur $\vec{E}$ lié à M est défini par ses composantes E_ξ, E_η, E_φ par rapport au repère rectangulaire local attaché à M (fig. 13).

Les composantes du vecteur $\vec{R} = \text{rot}\,\vec{E}$ sont données par :

$$\begin{aligned} R_\xi &= \frac{1}{BC}\left[\frac{\partial}{\partial\eta}(C E_\varphi) - \frac{\partial}{\partial\varphi}(B E_\eta)\right] \\ R_\eta &= \frac{1}{CA}\left[\frac{\partial}{\partial\varphi}(A E_\xi) - \frac{\partial}{\partial\xi}(C E_\varphi)\right] \\ R_\varphi &= \frac{1}{AB}\left[\frac{\partial}{\partial\xi}(B E_\eta) - \frac{\partial}{\partial\eta}(A E_\xi)\right] \end{aligned} \qquad (23)$$

2° *Equations du problème* :

On peut montrer qu'il suffit comme dans le cas sphérique, de se borner aux solutions (E) de révolution autour de l'axe. Le champ électrique se réduit aux seules composantes E_ξ et E_η et le champ magnétique à H_φ.

Les équations de Maxwell :

$$\text{rot}\,\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$
$$\text{rot}\,\vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$$

donnent alors en utilisant (23) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{AB}\left[\frac{\partial}{\partial\xi}(B E_\eta) - \frac{\partial}{\partial\eta}(A E_\xi)\right] &= -j\omega\mu H_\varphi \\ \frac{1}{BC}\frac{\partial}{\partial\eta}(C H_\varphi) &= j\omega\varepsilon E_\xi \\ -\frac{1}{CA}\frac{\partial}{\partial\xi}(C H_\varphi) &= j\omega\varepsilon E_\eta \end{aligned} \qquad (24)$$

Les deux dernières équations expriment E en fonction de H_φ. Il suffit de porter dans la première pour obtenir l'équation à laquelle satisfait H_φ. La plupart des auteurs introduisent la fonction :

$$U(\xi, \eta) = C H_\varphi$$

de sorte que :

$$\begin{aligned} E_\xi &= \frac{1}{j\omega\varepsilon}\frac{1}{BC}\frac{\partial U}{\partial\eta} \\ E_\eta &= -\frac{1}{j\omega\varepsilon}\frac{1}{CA}\frac{\partial U}{\partial\xi} \\ H_\varphi &= \frac{1}{C} U \end{aligned}$$

U satisfaisant à l'équation du second ordre :

$$(\xi^2 - 1)\frac{\partial^2 U}{\partial\xi^2} + (1 - \eta^2)\frac{\partial^2 U}{\partial\eta^2} + k^2 f^2 (\xi^2 - \eta^2) U = 0$$

qu'Abraham avait déjà obtenue.

Stratton et Chu, par contre, ayant en vue de se ramener à une équation étudiée par Stratton quelques années auparavant (16) posent :

$$U(\xi, \eta) = \frac{H_\varphi}{C}$$

$U(\xi, \eta)$ satisfait à l'équation :

$$(\xi^2 - 1)\frac{\partial^2 U}{\partial\xi^2} + (1 - \eta^2)\frac{\partial^2 U}{\partial\eta^2} + 4\xi\frac{\partial U}{\partial\xi} - 4\eta\frac{\partial U}{\partial\eta} + f^2 k^2 (\xi^2 - \eta^2) U = 0$$

Par séparation des variables :

$$U(\xi, \eta) = X(\xi)\, Y(\eta)$$

il vient :

$$(\xi^2 - 1) X''(\xi) + 4\xi X'(\xi) + f^2 k^2 \xi^2 X(\xi) = \alpha X(\xi)$$

$$(1 - \eta^2) Y''(\eta) - 4\eta Y'(\eta) - f^2 k^2 \eta^2 Y(\eta) = \alpha Y(\eta)$$

où α est une constante de séparation. Les deux équations ont la même forme :

$$(1 - u^2) Z''(u) - 4u Z'(u) + (\alpha - f^2 k^2 u^2) Z(u) = 0 \qquad (26)$$

C'est une équation de Mathieu associée. Sous le nom de fonctions sphéroïdales, Stratton avait recherché des solutions de cette équation adaptées aux problèmes de propagation. Sans entrer dans les détails d'une étude qui sortirait trop du cadre de cet exposé, essayons cependant de comprendre rapidement de quelle manière on généralise les solutions du cas sphérique. L'étude de $Y(\eta)$ se fait au moyen de solutions de (26) définies dans l'intervalle :

$$-1 \leqslant u \leqslant 1$$

Or, dans le cas de dégénérescence, $fk = 0$, l'équation :

$$(1 - u^2) Z''(u) - 4u Z'(u) + \alpha Z(u) = 0$$

est vérifiée pour les valeurs de α de la forme :

$$l(l + 3) \quad (l : \text{entier})$$

par les polynômes dits de Gegenbauer (*) :

$$C_l^{\frac{3}{2}}(u)$$

Les polynômes de Gegenbauer $C_l^\nu(u)$ sont les coefficients de h^l dans le développement de l'expression :

$$(1 - 2hu + h^2)^{-\nu}$$

(*) (30), p. 329.

Ils généralisent les polynômes de Legendre pour lesquels $\nu = \frac{1}{2}$. Ces polynômes sont ici proportionnels à la fonction :

$$T_l(u) = \frac{P_{l+1}^{1}(u)}{\sqrt{1-u^2}} \qquad (*)$$

On peut d'ailleurs faire une vérification directe. Toute série en $T_n(u)$ constitue donc une solution de l'équation dégénérée. Si l'on revient à l'équation (26), on peut se proposer de mettre les valeurs caractéristiques de α sous la forme :

$$\alpha = l(l+3) + \varepsilon_l(fk)$$

où le terme correctif ε_l tend vers zéro avec fk. Stratton associe alors à chaque l une solution de (26) écrite sous forme de série :

$$Se_l^1(fk, u) = \sum_n d_n^l T_n(u)$$

ε_l est choisi de manière à assurer la convergence aux limites $u = \pm 1$. Bien entendu les $d_n{}^l$ sont calculés, à la manière habituelle, par récurrence, lorsqu'on exprime que l'équation (26) est satisfaite.

D'un autre côté, $X(\xi)$ correspond aux solutions de (26) définies pour $|u| \geqslant 1$. Lorsque $|u|$ est grand, $u^2 - 1$ se comporte comme u^2 et l'équation (26) devient :

$$Z''(u) + \frac{4}{u} Z'(u) + \left(f^2k^2 - \frac{\alpha}{u^2}\right) Z(u) = 0$$

à laquelle on peut satisfaire au moyen de la fonction :

$$Z(u) = (fku)^{-\frac{3}{2}} H^{(2)}_{n+\frac{3}{2}}(fku)$$

comme on le vérifiera aisément. En procédant comme précédemment, on peut définir des solutions de (26) sous forme de séries :

$$Re_l^4(fk, u) = (fku)^{-\frac{3}{2}} \sum_n a_n{}^l H^{(2)}_{n+\frac{3}{2}}(jku)$$

En définitive, on aura des solutions telles que, par exemple :

$$H_\varphi = f\sqrt{(\xi^2-1)(1-\eta^2)} \sum_l A_l Re_{l_0}^4(\xi) Se_l^1(\eta)$$

qui sont la généralisation de :

$$H_\varphi = \frac{j\omega\varepsilon}{\sqrt{r}} \sum_l A_l H^{(2)}_{l+\frac{1}{2}}(kr) P(\cos\theta)$$

obtenue dans le cas sphérique.

En dehors des complications mathématiques dont on vient de dire quelques mots, la marche suivie est la même que pour l'antenne sphérique. La zone d'alimentation est délimitée sur l'ellipsoïde $\xi = \xi_0$ par les deux parallèles :

$$\eta = \pm \Delta\eta$$

d'écartement :

$$ds = 2B.\,\Delta\eta$$

La condition frontière est

$$E\eta + E_\mu^{(a)} = 0$$

pour :

$$\xi = \xi_0$$

$E_\eta^{(a)}$ est nul pour $|\eta| > \Delta\eta$ et sensiblement égal à $-\frac{V_0}{2B.\,\Delta\eta}$ dans l'intervalle $|\eta| < \Delta\eta$. Pour assurer la convergence des séries, on s'interdit toujours le passage à la limite $\Delta\eta = 0$. $\Delta\eta$ est pris petit mais fini, et on se limite à la somme des premiers termes.

4° *Résultats* :

a) Impédance d'entrée : Stratton et Chu ont donné des courbes qui ne s'étendent guère au delà de la première résonance. Il aurait été intéressant de disposer de résultats numériques et surtout de connaître le comportement de l'antenne vers la première antirésonance en vue de la comparaison avec les autres théories.

Quatre cas ont été considérés par les auteurs : $1 - e = 10^{-8}$, 10^{-6}, 10^{-4}, 10^{-2}, où e désigne l'excentricité. Il est plus suggestif de caractériser la forme de chaque ellipsoïde par son « allongement » $\frac{l}{a}$, rapport de la demi-longueur l au rayon équatorial a. Les quatre cas considérés sont les suivants : $\frac{l}{a} = 7070,\ 707,\ 70.7,\ 7.07$. Le cas de la sphère correspond à $\frac{l}{a} = 1$.

Les variations de la conductance et de la susceptance d'entrée sont représentées sur la figure 14. Elles ont été obtenues à partir de courbes données par Stratton et Chu. La fig. 15 reproduit les courbes de la résistance et de la réactance de ces auteurs.

Les principales remarques que l'on peut faire sont les suivantes : la résonance a lieu au voisinage de l'abscisse $\frac{l}{\lambda} = 0{,}25$. La conductance présente un maximum aigu un peu en deçà de cette valeur. L'épaississement de l'antenne influe peu sur la position de ce maximum, mais diminue son acuité. Sur la fig. 15, on note que la résistance d'entrée de l'antenne est pratiquement indépendante de la forme jusqu'au delà du quart d'onde pour lequel on retrouve les 70 ohms de la théorie classique. D'ailleurs, seule la courbe relative à la plus épaisse des quatre types d'antennes se détache des trois autres et on note l'amorce du premier maximum.

Par contre, la réactance d'entrée est sensible à l'épaississement de l'antenne, sauf au voisinage de la résonance. La première antirésonance apparaît même pour la quatrième courbe. Pour celle-ci, on retiendra la faible variation de la réactance sur une large bande de fréquences. On justifie ainsi l'emploi des antennes épaisses en télévision.

b) Courant : signalons simplement que, selon les auteurs, à la résonance, la distribution obtenue est

(*) (30), page 329.

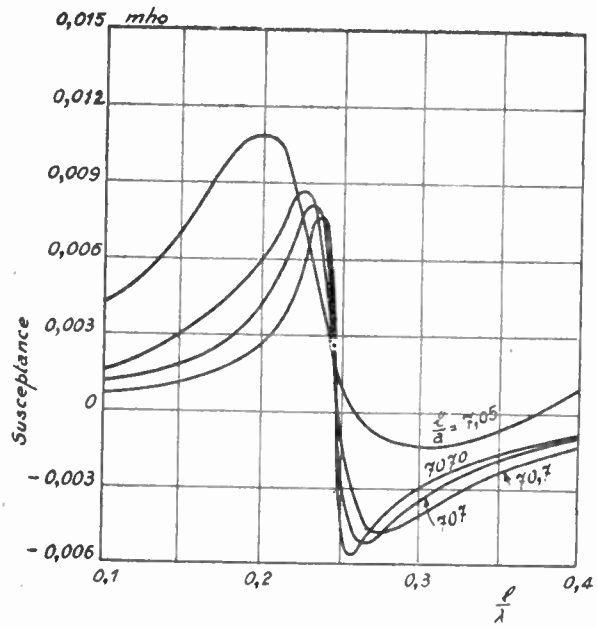


FIG. 14 *a*

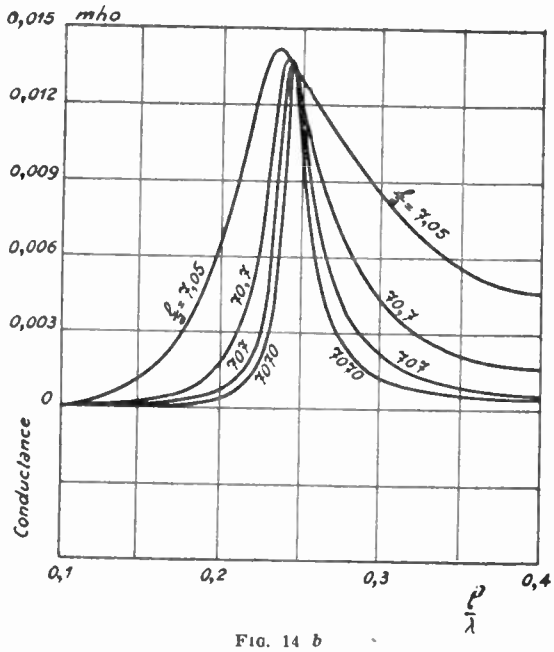


FIG. 14 *b*

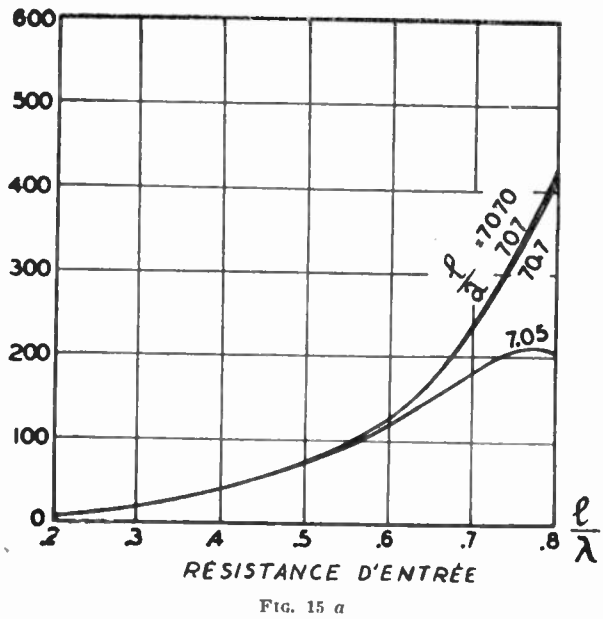


FIG. 15 *a*

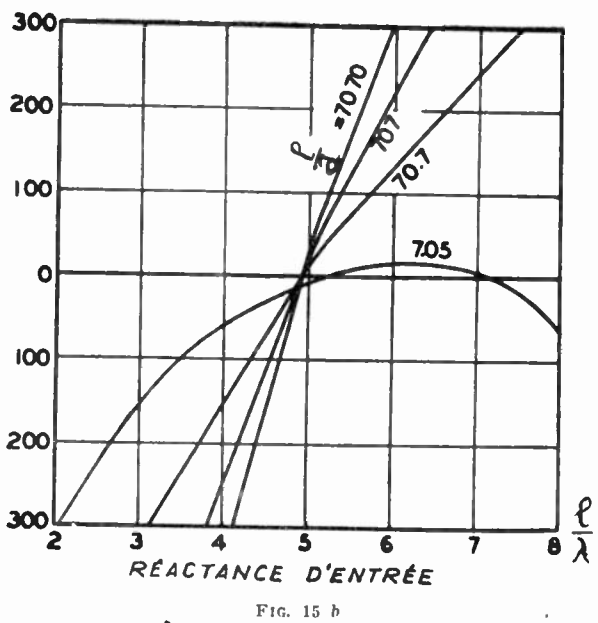


FIG. 15 *b*

sinusoïdale. Au voisinage, la courbe de distribution tend à s'aplatir lorsque le rapport $\frac{l}{\lambda}$ diminue. Au point de vue pratique, on voit qu'on peut s'attendre à d'excellents résultats lorsqu'on adopte les hypothèses classiques pour le dipôle mince $\left(\frac{l}{4} = \lambda\right)$ ou pour le quart d'onde au sol.

c) Puissance rayonnée : on procède comme pour l'antenne sphérique.

(*A suivre*).

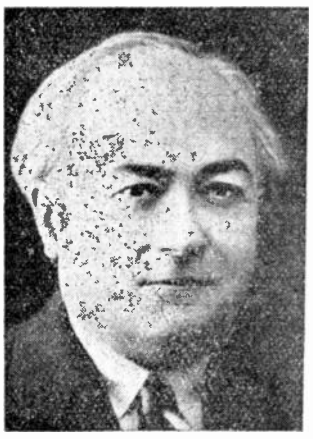
L'OEUVRE RADIOÉLECTRIQUE DE JOSEPH BETHENOD

par

M. Léon Bouthillon,

Ancien Président de la Société des Radioélectriciens

I. — ORIGINES ET FORMATION



Notre ancien président Joseph Bethenod, à la mémoire duquel j'ai l'honneur de rendre hommage aujourd'hui devant vous, aimait, sur la fin de sa vie, à raconter qu'il s'était trouvé dans sa jeunesse devant trois voies qui toutes trois devaient le conduire à l'Académie.

Ses maîtres de l'Institution des Minimes, à Lyon où il fit ses premières études, eussent volontiers choisi pour lui la carrière ecclésiastique. Il serait devenu, peut-être, évêque et membre de l'Académie française.

Apte aux études littéraires, doué d'une puissante imagination et d'une mémoire sans défaut, il aurait probablement fait une belle carrière de romancier qui eût pu lui ouvrir les portes de l'immortalité.

C'est une troisième vocation qu'il a choisie.

L'électricité industrielle, alors parée des attraits de la jeunesse et brillante de l'éclat que lui conféraient les noms prestigieux de Maurice Leblanc, Paul Boucherot, André Blondel, séduisit l'imagination du futur inventeur qui, dès 1903, à vingt ans, publia dans *La Houille Blanche*, un premier mémoire sur la théorie des moteurs à réaction.

Ce travail, envoyé à Blondel, attira l'attention de celui-ci. Physicien, ingénieur, savant, Blondel, dont on ne dit pas assez qu'il a été le plus grand théoricien français des débuts de la radioélectricité et l'auteur de mémorables inventions, était un découvreur de jeunes talents. Et les ayant découverts, il s'attachait à eux, les suivait, n'épargnait aucune peine pour les mettre en valeur. Ayant moi-même profité de ses encouragements, je ne m'étonne pas de ce que Bethenod, épaulé par lui au début, affectueusement aidé pendant toute sa carrière par le maître dont il était devenu l'émule, ait toujours manifesté envers lui une reconnaissance émue.

Blondel distingua Bethenod et en fit son assistant. Sa carrière était dès lors fixée : il serait électricien.

Mais il était tout le contraire d'un spécialiste. De ses études littéraires primitives lui restait le goût des idées générales. Quant à sa formation scientifique, il l'avait acquise par un travail personnel et avait échappé à la discipline parfois desséchante, au compartimentage excessif qu'imposent trop souvent les enseignements spécialisés. Il savait d'intuition qu'il est mauvais de s'enfermer dans une étroite clôture, que le développement de la technique et de la science exige des esprits ouverts, ayant des idées d'ensemble, capables de transposer dans un domaine des progrès acquis dans un autre. Il savait tout le prix des travaux scientifiques, surtout de ceux ayant une valeur générale. Grand admirateur des illustres théoriciens français de l'analyse mathématique, de la géométrie et de la mécanique, et notamment des grands physiciens-géomètres du début du XIX^{e} siècle, il aimait, tout jeune, collectionner leurs éditions originales. Et quand, devenu lui-même un illustre maître, consacré par les lauriers académiques, il fut sollicité par ses amis des Compagnies françaises de télégraphie sans fil de leur indiquer quel souvenir de son élection à l'Académie des Sciences pourrait lui être le plus agréable, c'est les œuvres de Cauchy et de Lagrange qu'il choisit comme celles qu'il verrait avec le plus de plaisir dans sa bibliothèque.

Mais ce culte des maîtres de la science française n'était pas exclusif. Bethenod avait au plus haut point, en même temps que l'imagination créatrice, l'art du concret et le goût des réalisations pratiques. Il ne se contentait pas d'inventer pour les autres, il aimait bricoler par lui-même. Le gamin qui, à huit ans, construisait des locomotives remarquées, avait survécu dans l'académicien qui, au début de la guerre, avait conjuré les restrictions d'essence en construisant de ses mains une petite voiture électrique qu'il aimait faire essayer à ses amis.

Il déplorait souvent que l'instruction donnée aux ingénieurs électriciens fût trop confinée à l'électrotechnique pure et qu'un trop grand nombre n'aient pas eu le bénéfice d'une formation mécanique qu'il estimait, plus qu'utile, absolument nécessaire. C'est un défaut qu'on ne risquait pas de voir chez lui. On retrouve les résultats de cet état d'esprit dans un grand nombre de ses réalisations en électrotechnique, en radioélectricité et, plus encore, dans l'automobile auquel, d'ailleurs grand amateur et grand praticien, il apporta d'importants perfectionnements.

WRH

Electrotechnique, radioélectricité, mécanique et automobile, tels sont les trois domaines principaux de l'activité d'une intelligence et d'une imagination claires et constructives, aussi soucieuses de progrès durables que de réalisations pratiques immédiates. Les travaux de Joseph Bethenod dans ces trois directions ont été analysés déjà dans la belle notice que leur a consacrée M. G. Darrieus (*Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 6e série, tome V, janvier 1945). D'autre part, M. Louis de Broglie, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences et le Comité Blondel ont le projet de réunir ses œuvres principales en une publication où les chercheurs de l'avenir trouveront l'exemple d'un travail probe et fécond, en même temps que le témoignage de services éminents rendus à la science et à la technique.

A côté de ces manifestations, j'ai pensé que le meilleur moyen, pour nous, de rendre hommage à la mémoire de notre ancien président était de nous limiter à la partie de son œuvre que nous sommes le mieux à même d'explorer, celle qui a consacré sa renommée, c'est-à-dire ses travaux dans le domaine de la radioélectricité.

J'utiliserai en particulier dans ce but les deux notices rédigées par Bethenod en vue de son élection à l'Académie des Sciences, ainsi que le livre d'or de la Société Française Radioélectrique.

Comme pour beaucoup de ceux qui, jeunes au début du siècle, ont ensuite fourni les cadres de la T. S. F. française, c'est pendant le service militaire à la Tour Eiffel que s'affirma la vocation radioélectrique de Bethenod. Assistant d'André Blondel, il avait été chargé d'assurer la liaison avec le capitaine Ferrié. Celui-ci le fit venir à la Tour Eiffel et le choisit comme assistant. L'appel de la jeune T. S. F. était alors irrésistible. Bethenod serait radioélectricien.

Son lieutenant, Paul Brenot, aujourd'hui président et directeur général de la Société Française Radioélectrique, en fit son ami et, le service militaire terminé, le mit en relations avec M. Emile Girardeau. Ces trois hommes ne se séparèrent plus. En 1910, au moment où il fonda la Société Française Radioélectrique, Emile Girardeau s'associa Joseph Bethenod. Ce fut le début d'une collaboration que la mort seule a interrompue.

II. — LES POSTES RADIOÉLECTRIQUES A ÉTINCELLES

La première publication de Joseph Bethenod, sur la radioélectricité fut un important article (1) de l'*Eclairage électrique* « *sur le transformateur à résonance* » (1907). Les anciens radioélectriciens — on était alors au temps de la T. S. F. à étincelles — se souviennent que des avis divers opposaient alors les techniciens sur le meilleur mode de charge des condensateurs. L'antenne était excitée par un circuit à condensateur contenant un éclateur, et le problème était de charger périodiquement ce condensateur qui se déchargeait, à chaque fois, dans le circuit à étincelles. Il s'agissait d'obtenir, avec une puissance donnée, la plus haute tension de charge possible.

Les uns, suivant la pratique inaugurée par Hertz et suivie par Marconi, employaient des transformateurs à noyau ouvert, du type de la bobine de Rhumkorff (fig. 1) et ce dispositif a fait une belle carrière ; c'est en particulier avec lui que fut établie la première liaison radiotélégraphique à travers la Méditerranée, au moyen de deux postes établis l'un à Fort-de-l'Eau, près d'Alger, l'autre aux Saintes-Maries-de-la-Mer par notre regretté collègue G.-E. Petit, alors chef du Service de Télégraphie-sans Fil qui venait d'être créé par l'Administration française des Postes et Télégraphes.

Les autres préféraient le transformateur à noyau fermé, alimenté par le secteur électrique, suivant le montage de la figure 2, et l'on avait remarqué qu'une bobine de self-inductance placée dans le primaire (ou le secondaire) permettait d'augmenter notablement le tension de charge du condensateur. Cette solution, qui avait été proposée par d'Arsonval en 1896 en vue des applications médicales de la haute fréquence, avait été l'objet de quelques recherches, et notamment d'une importante étude expérimentale et théorique d'André Blondel.

Chargé par le capitaine Ferrié d'étudier les projets du matériel radiotélégraphique destiné aux postes alors projetés par le Service de la Télégraphie militaire pour la guerre et les colonies, Bethenod, après s'être convaincu par une recherche expérimentale des avantages du procédé, aboutit à une méthode de calcul pratique.

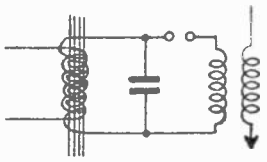


FIG. 1.

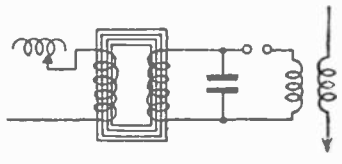


FIG. 2

L'expérience, bientôt expliquée par la théorie, le conduisit, à cette occasion, à la découverte de la ferro-résonance, due à l'effet de la saturation, dans le cas où des bobines de self-inductance ou des transformateurs sont associés à des condensateurs et qui se traduit par l'existence de deux régimes de fonctionnement stables. A ce phénomène souvent étudié depuis et retrouvé dans divers domaines, le nom de Bethenod est resté attaché.

Les premiers postes établis suivant cette technique utilisèrent des transformateurs de modèle industriel et, comme sources, le réseau de distribution d'électricité à la fréquence de 50 périodes par seconde. A raison d'une étincelle par demi-période, cela fait 100 étincelles par seconde. L'utilisation de la résonance conduisait d'ailleurs, afin d'augmenter au maximum la tension, à raréfier l'étincelle, et les anciens habitants du Champ-de-Mars n'ont pas oublié le bruit, analogue à celui du tambour, de la « roulante » de la Tour Eiffel, qui accompagnait l'éclatement des étincelles.

La gêne qu'il causait aux voisins était le moindre défaut du système. Un autre était que le son perçu à la réception, et dont la hauteur était de l'ordre de quelques dizaines de périodes par seconde, se distinguait difficilement des parasites. Pour y remédier, André Blondel avait, dès 1898, suggéré

d'augmenter la fréquence des étincelles de telle façon que le son perçu (de l'ordre de 1.000 périodes par seconde) fût aisément perceptible malgré les parasites. On y gagnait l'avantage supplémentaire de se trouver dans le domaine de fréquence correspondant au maximum de sensibilité de l'oreille. Blondel avait également indiqué la solution par l'emploi d'alternateurs de fréquence dite musicale (500 à 1.000 périodes par seconde). Bethenod reprit la question et établit un matériel d'émission complet, dont l'organe essentiel était un alternateur à forte réaction d'induit dont la réactance propre était utilisée pour la mise en résonance, ce qui permettait d'alimenter directement un transformateur industriel chargeant la capacité du circuit oscillant. Cet alternateur fut établi pour 600, 1.000 et même 1.500 périodes par seconde, obtenues sans l'emploi de vitesses exagérées et avec un rendement excellent, du fait du maintien précis des conditions de résonance et du mode de construction des machines.

Fidèle à sa méthode constante de faire marcher du même pas l'expérience et la théorie, Bethenod donna l'explication complète du fonctionnement du système en partant de la théorie des deux réactions de Blondel, dans un article (7) de *la Lumière Electrique*, en 1909. Les conclusions de cette étude ont du reste été mises à profit pour l'étude du fonctionnement des alternateurs dans des réseaux contenant des capacités.

Un alternateur de 22 kilowatts à 800 périodes par seconde de ce type fut étudié et installé en 1909 à la station de la Tour Eiffel. L'éclateur était du type pointe-plateau ; l'étincelle était soufflée par un ventilateur.

Adopté par la Société Française Radioélectrique, ce matériel fut réalisé en de très nombreux exemplaires, avec des puissances diverses atteignant 300 kilowatts, pour les stations fixes (Tour Eiffel, places fortes de l'Est, stations côtières des P. T. T., radiophares, nombreux postes coloniaux et étrangers), ou mobiles (postes militaires, postes d'aéronefs et d'avions, postes de navires).

En 1910, Bethenod établit le premier poste d'émission pour dirigeable, où les étincelles étaient obtenues au moyen d'un vibrateur et qui fut installé sur le « Clément-Bayard » et, le commandant Ferrié étant l'opérateur, fit les manœuvres de Picardie. A la même époque, il construisit le premier matériel d'avion où, pour réduire le poids, une magnéto d'allumage était utilisée pour l'alimentation. Ce poste fut essayé par le capitaine Brenot sur un avion Farman.

L'émission par étincelles posait d'ailleurs d'autres problèmes auxquels Bethenod ne pouvait manquer de s'intéresser. Les premiers essais de Marconi (1895) qui datent aujourd'hui de cinquante ans, avaient consisté à exciter directement l'antenne, coupée par un éclateur, au moyen d'une bobine de Rhumkorff (fig. 3). Mais on s'était vite aperçu de ce que cette disposition avait pour conséquence, en superposant dans un même circuit la résistance de l'antenne et celle de l'étincelle, un grand amortissement des trains d'onde émis et un encombrement de l'éther que le développement des radiocommunications rendit rapidement inadmissibles. Un premier remède fut de répartir les résistances sur deux circuits accordés et couplés, l'un constitué par l'antenne, l'autre contenant une capacité, une self-inductance, un éclateur (fig. 4 et 5) et relié à la source de charge. Sur le mode de couplage les techniciens de l'époque étaient divisés entre partisans du radio-transformateur à deux enroulements (Tesla, fig. 4) et partisans de l'autotransformateur (Oudin, fig. 5). La réalisation des circuits et la théorie du couplage firent alors l'objet d'un nombre imposant d'études. Sur toutes ces questions Joseph Bethenod avait son avis et le disait en de courts articles, suivant une méthode qui lui devint habituelle, où il exposait et justifiait ses idées avec une précision qui ne faisait aucun tort à la clarté (2. 4. 5, 6, 9, 10).

Une autre grosse question de l'époque de la

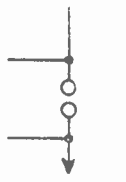


FIG. 3

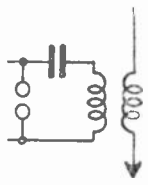


FIG. 4

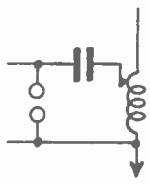


FIG. 5

télégraphie sans fil à étincelles fut celle de l'excitation par choc. Le système à deux circuits, bien que représentant un succès important vis-à-vis de l'excitation directe, présentait l'inconvénient que, l'énergie s'emmagasinant successivement dans l'un et dans l'autre, l'amplitude du courant de haute fréquence dans l'antenne passait par une série de maximums et de minimums, à la manière de battements, et qu'en conséquence l'antenne rayonnait, non pas une seule fréquence mais deux fréquences distinctes ce qui, encore une fois, encombrait l'éther à un degré incompatible avec le développement des

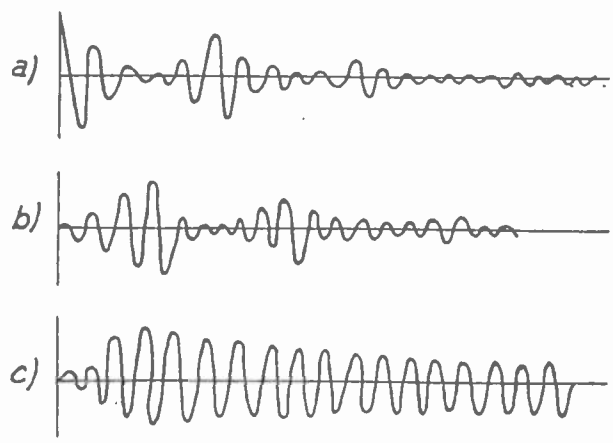


FIG. 6

a) Oscillations du circuit d'excitation (couplage indirect).
b) Oscillations du circuit d'antenne (couplage indirect).
c) Oscillations du circuit d'antenne (excitation par choc).

radiocommunications (fig. 6*a* et *b*). Aussi s'appliqua-t-on à supprimer la réaction de l'antenne sur le circuit d'excitation aussitôt que celui-ci avait transféré son énergie à l'antenne. Dans ces conditions, dès la charge terminée, l'antenne se décharge par oscillations d'une seule fréquence, celle du circuit

d'antenne, et avec un amortissement réduit (fig. 6c), la seule résistance (à part la résistance ohmique des conducteurs) étant la résistance de rayonnement, qui représente l'énergie utile. Les éclateurs devaient, pour fournir ce résultat, présenter des caractéristiques déterminées qui firent l'objet d'un certain nombre de brevets. Bethenod revint sur la question en 1918 et donna à cette occasion une théorie du fonctionnement dans la *Revue Générale de l'Electricité* (17).

III. — LA THÉORIE DES CIRCUITS COUPLÉS ET SES APPLICATIONS

Les derniers articles auxquels nous avons fait allusion présentent sous des aspects divers et avec des conséquences diverses la théorie des circuits couplés excités par une force électromotrice harmonique. C'est une question sur laquelle Bethenod aima revenir souvent, développant l'étude et en tirant des résultats nouveaux. Commencée en 1909, cette suite renouvelée chaque fois par l'actualité ne se termina qu'en 1923.

Cela débute en 1909 par deux articles *Sur le fonctionnement d'une antenne excitée par dérivation* : le premier (2) a pour objet le calcul des fréquences, le second (5) celui des amortissements, par une méthode de calcul intéressante, susceptible d'autres applications.

En 1909-1910, paraissent deux articles importants *Sur la réception des ondes électromagnétiques dans la radiotélégraphie* (4) qui sont, en somme, une étude complète du système de deux circuits couplés avec une force électromotrice sinusoïdale insérée dans l'un d'entre eux. L'application à la réception est plus particulièrement envisagée dans le cas du couplage inductif. Le premier article concerne le cas de l'accord entre les deux circuits, il donne la formule du rendement d'une transmission d'énergie radioélectrique. Le second étudie le cas du désaccord ; il recherche l'influence du degré de couplage ; il démontre pour la première fois la possibilité d'une série de réglages donnant tous deux le maximum de réception.

L'étude se poursuit en 1910 par la *Comparaison des montages direct et indirect dans les stations radiotélégraphiques* (8) Bethenod disait son mot dans la querelle du « Tesla » et de l'« Oudin ».

Presque en même temps, il donnait son avis motivé *Sur l'emploi du circuit intermédiaire de Stone en radiotélégraphie* (9) — 1910. Généralisant la méthode précédemment employée dans l'étude du montage en dérivation, il calcule les fréquences propres et les amortissements correspondants.

En 1913, dans un article *Sur la valeur la plus favorable de la résistance utile d'un résonateur* (10), il montre que, dans le cas des ondes amorties, l'amortissement utile le plus favorable est légèrement supérieur à celui dû aux pertes de toute nature, tandis qu'il lui est égal dans le cas des ondes entretenues.

Et la série se poursuivra quand il s'agira d'étudier la transmission de l'énergie d'un alternateur de haute fréquence à une antenne. C'est, en 1915, un important travail *Sur le réglage des postes radiotélégraphiques à ondes entretenus produites par les machines à haute fréquence* (12), adaptation au cas de l'émission de la théorie des circuits couplés établis en 1909 à propos de la réception (4). L'influence du degré de couplage et du réglage des caractéristiques des circuits sur la puissance et le rendement est discutée. Une méthode de mesure de la résistance apparente d'une antenne est décrite. Un nouvel article (12) — 1917 — donne un exemple numérique sur un cas particulier. La question est reprise en 1919 dans une étude *Sur les machines à haute fréquence et leur réglage* (19) — 1919.

On trouve en 1918 un article *Sur la théorie de l'excitation par choc d'un circuit oscillant* (17), auquel nous avons déjà fait allusion.

Les applications à la réception sont enfin l'objet d'une suite d'études :

Sur la théorie des circuits radiotélégraphiques et radiotéléphoniques (20) — 1919 — qui donne la théorie de la réception avec détecteur à loi quadratique, avec détermination des réglages procurant le maximum d'intensité et théorie graphique de la résonance musicale ;

Sur la théorie des systèmes récepteurs différentiels (25) — 1922 — dans lequel l'auteur recherche le meilleur réglage pour l'affaiblissement des parasites, sans que les signaux soient notablement diminués. Il montre que certains réglages sont équivalents à celui obtenu par le moyen des circuits intermédiaires ;

Théorie de la réception sur antenne apériodique (31) — 1923. Comme conséquence de la théorie du récepteur donnée en 1909 (4), l'auteur établit que sur antenne apériodique la réception peut être aussi forte qu'avec une antenne accordée. La démonstration, très simple, est basée sur le principe de la conservation de l'énergie.

Cet ensemble d'articles, parfaitement enchaînés et rattachés à une idée commune est caractéristique de la manière de Bethenod, toujours soucieux de guider l'expérience par la théorie, de ne laisser sans explication aucun phénomène révélé par l'expérience. On ne peut qu'admirer, comme l'a si bien dit dans sa notice M. G. Darrieus « cette attitude indépendante, mais toujours large et élevée à l'égard même d'humbles problèmes, ainsi que la préoccupation de les rattacher toujours aux grands principes... C'est ce souci constant de portée et de généralité des résultats, fruit d'une forte culture scientifique ainsi que d'un sens profond et sûr des faits essentiels, qui contribue à rendre l'étude d'une œuvre comme celle de Bethenod si fructueuse et digne d'être proposée aux efforts des débutants ».

IV. — L'ALTERNATEUR A HAUTE FRÉQUENCE

J'ai, pour exposer les travaux se rapportant aux circuits couplés, interrompu l'exposé des débuts de la T. S. F. à étincelles au moment où celle-ci, dans la recherche d'un encombrement minimum de l'éther, avait évolué de l'excitation directe vers l'excitation indirecte, puis vers l'excitation par choc.

Pour diminuer l'encombrement de l'éther, le moyen idéal était d'émettre des ondes pures, d'amplitude constante. Le moyen de les obtenir fut étudié dès la naissance de la radioélectricité et la

première solution mise en application sur une grande échelle fut l'arc à haute fréquence. Mais le rendement était médiocre et la gêne causée aux stations voisines était encore considérable.

La solution par l'alternateur à haute fréquence, si elle était réalisable, était beaucoup plus tentante.

La question était étudiée en France. Dès 1907, Joseph Bethenod s'y était intéressé (**11**) et avait proposé un alternateur inspiré d'une machine de Dolezalek, construite par Siemens et Halske pour les mesures en courant de fréquence acoustique.

Elle se composait (fig. 7) d'un rotor denté en tôle de fer feuilleté aussi finement que possible, tournant à l'intérieur d'un stator portant un nombre de dents égal à celui du rotor et muni d'un enroulement parcouru par un courant continu et créant une série de pôles magnétiques alternés. Quand le rotor tourne il se produit dans l'enroulement, par variation de la self-inductance, un courant alternatif d'induction qui se superpose au courant excitateur et peut alimenter par exemple une antenne radiotélégraphique A. Une bobine de self-inductance L en série avec la source de courant continu et un condensateur C en dérivation empêchent le passage du courant alternatif par la source P.

La fréquence est donnée par la formule :

$$f = m\,n$$

m étant le nombre de pôles du rotor et n le nombre de tours par seconde. Elle est double de la valeur obtenue avec un alternateur à rotor excité suivant les principes usuels.

Mais cet avantage était contrebalancé par la nécessité de réduire la vitesse à cause de l'emploi de tôles feuilletées et de choisir un pas polaire plus grand qu'avec une machine normale, en raison de l'effet très accusé des fuites magnétiques.

La machine ne fut pas construite, pas plus qu'une autre basée sur les variations de capacité de deux disques dentés, dont l'un tournait en regard de

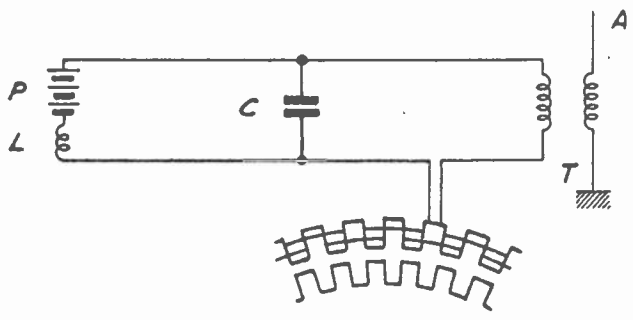


FIG. 7

l'autre, envisagée par Joseph Bethenod fin 1908 (**11**).

La question était d'ailleurs étudiée en Allemagne et en Amérique.

En 1912, la Société allemande Telefunken avait construit, pour la grande station de Nauen, un ensemble comportant un alternateur de fréquence relativement élevée et des multiplicateurs de fréquence. En 1913, l'ingénieur allemand Rudolf Goldschmidt, réinventant un type de machines dont Paul Boucherot avait auparavant indiqué le principe, avait réalisé des alternateurs à haute fréquence qui, très admirés à l'époque, donnèrent ensuite de graves mécomptes.

A la même époque, aux Etats-Unis, Alexanderson, appliquant toutes les ressources de la mécanique à la réalisation d'alternateurs homopolaires, préparait les belles machines à haute fréquence qui, par la suite, ont équipé les stations américaines à grande puissance.

En France, la question n'était pas perdue de vue. Le 9 septembre 1909, Bethenod avait conclu avec le chef de bataillon Ferrié un marché pour la fourniture d'un alternateur à haute fréquence qui fut réalisé sous une forme plus simple que la machine Goldschmidt, comportant la mise en cascade d'alternateurs diphasés (**11**).

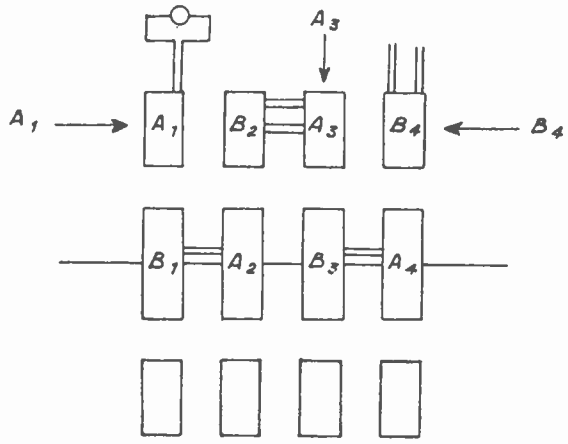


FIG. 8

Soit A1 le stator d'un premier alternateur alimenté par exemple par une source à courant continu D ; le rotor B1 est parcouru par un courant diphasé de fréquence f. Ce courant est transmis au rotor A2, les connexions étant faites de façon que le champ tournant produit par A2 tourne dans le même sens que le rotor ; on obtient alors dans le stator B2 un courant de fréquence $2f$. En passant de même de B2 à A3, on a dans le rotor B3 un courant de fréquence $3f$ qui, transféré au rotor A4, donne dans B4 un courant diphasé de fréquence $4f$.

Pour alimenter l'antenne A au moyen de ce courant diphasé, la force électromotrice de la phase 1 était insérée dans l'antenne, celle de la phase 2 était couplée par un transformateur par l'intermédiaire d'un circuit à self et condensateur. Dans ces conditions, si l'on suppose les condensateurs réglés de façon à supprimer tout effet de self induction dans leurs circuits respectifs et si l'on appelle R la résistance de l'antenne (résistance de rayonnement compris), la condition nécessaire et suffisante pour que les amplitudes des courants circulant dans les deux circuits soient les mêmes est que leur déphasage relatif dans le temps soit $\frac{\pi}{2}$ et que la relation

$$M = \frac{R}{4\,\pi\,m\,f}$$

soit satisfaite, $m\,f$ étant la fréquence fournie par le dernier alternateur diphasé.

Un alternateur établi sur ce principe en 1914 par la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques fournissait la fréquence de 24.000 périodes par seconde avec 5 kilowatts de puissance. Il fut mis en service en 1915 au poste de Lyon-la Doua.

Cependant la difficulté d'obtenir des fréquences suffisantes suivant les principes utilisés dans les alternateurs usuels, et même dans les alternateurs homopolaires qui, toutes choses égales d'ailleurs, produisent en principe une fréquence double, conduisait à rechercher des artifices permettant de

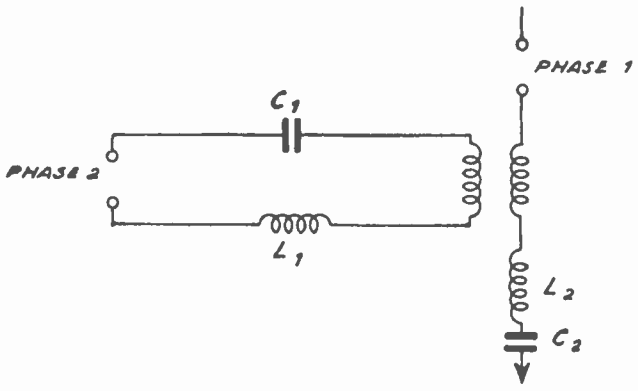


FIG. 9

multiplier la fréquence. Finalement, la Société Française Radio-Electrique représentée en particulier par J. Bethenod et M. Marius Latour, et la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques, avec la collaboration de MM. Roth, Belfils et Bilieux, résolurent définitivement le difficile problème qu'elles s'étaient posé, et la première machine du type définitif fut un alternateur à haute fréquence de 220 kilowatts, 20.000 périodes par seconde qui fut installé en août 1919 au poste de Lyon-la-Doua.

Pour faciliter la construction du stator sans diminuer la fréquence, on utilisait un principe que j'avais indiqué en 1913, consistant à employer des nombres différents de pôles sur le rotor et le stator (*Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones*, 3e vol., p. 618, 1913 et *Jahrbuch der Drahtlosen Telegraphie*, vol. 8, p. 34, 1914) et dont un cas particulier avait ensuite été breveté en 1915 par M. Marius Latour. (Brevet 502.440, 7 septembre 1915). Etant donné un rotor homopolaire dont les pôles magnétiques (par exemple tous des pôles nord) vus de face sont représentés par les rectangles hachurés de la figure 10, les principes usités dans la construction des alternateurs auraient conduit, pour le stator, au type d'enroulement représenté par la figure 10*a*. Le nombre de pôles du stator est alors double de celui du rotor et la place disponible pour les enroulements est trop réduite pour que les hautes fréquences nécessaires puissent être atteintes sans difficulté.

L'artifice adopté consiste à supprimer deux sur trois des conducteurs actifs du stator et à réaliser l'enroulement suivant le schéma de la figure 10*b*. Ainsi, sans que soit diminuée la fréquence, le nombre de pôles du stator est divisé par trois, et la place disponible pour l'enroulement devient suffisante. J. Bethenod a du reste révélé plus tard (**41**) que la même disposition avait été employée antérieurement par Villard dans un alternateur du type Mordey.

Bien d'autres problèmes restaient à résoudre.

Celui des tôles magnétiques suffisamment minces et possédant les qualités requises n'était pas le moindre. On mit à profit les travaux de M. Jouaust sur les propriétés du fer en haute fréquence.

Il fallait établir la forme et le dimensionnement le plus approprié des pôles et encoches du stator et du rotor. Joseph Bethenod apporta à cette étude une importante contribution (Brevet 492.414).

Il était nécessaire d'éviter les pertes de frottement qui eussent été considérables du fait de la grande vitesse de rotation si le rotor eût tourné dans l'air à la pression normale : on y parvint en établissant dans l'entrefer un vide partiel.

Il fallait assurer le refroidissement de la machine en évacuant la chaleur produite dans les enroulements et les tôles; une circulation d'huile sous pression résolut la difficulté.

Et bien d'autres questions de détail se posèrent, auxquelles l'ingéniosité de l'équipe de la Société Française Radio-Electrique et de la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques apporta les réponses appropriées.

L'alternateur à haute fréquence était créé. Les types divers s'échelonnaient de 25 à 500 kilowatts

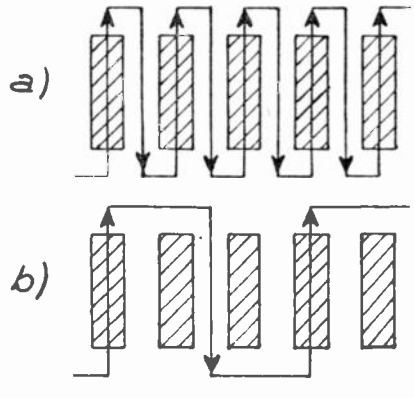


FIG. 10

Nous donnons en exemple les caractéristiques principales de deux machines de 250 et 500 kilowatts.

	250 kW	500 kW
Vitesse, tours/minute	3.000	2.330 / 2.500
Fréquence.....	20.400	14.000 / 15.000
Nombre de dents du rotor .	408	360
Nombre de dents du stator.	272	240

L'alternateur construit, il était nécessaire de mettre au point l'organisation qui permettrait d'en tirer le meilleur parti pour l'application aux radiocommunications :

Régulation de la fréquence, d'autant plus nécessaire que l'utilisation comportait le fonctionnement en résonance avec les circuits électriques : ce fut l'œuvre de l'illustre ingénieur Thury, de Genève. Mais Bethenod avait apporté à la question une intéressante contribution.

Liaison entre l'alternateur et l'antenne. C'était une question à laquelle Bethenod était préparé depuis longtemps. Dès 1909-1910, il avait publié dans le *Jahrbuch der Drahtlosen Telegraphie* une théorie des circuits couplés en oscillations entretenues, basée sur une discussion générale des propriétés du système de deux circuits couplés, accordés ou non, dont l'un est soumis à une force électromotrice harmonique. L'étude fut reprise à l'occasion du réglage des postes à alternateur et donna lieu à des articles dans *la Lumière Electrique* (12), 1915, puis dans la *Revue Générale de l'Electricité* (12), 1917.

D'autre part, dans le but d'augmenter les possibilités et la souplesse de l'exploitation, fut étudié le couplage de plusieurs alternateurs qui pouvaient ainsi débiter en parallèle sur une même antenne, multipliant la puissance rayonnée en rapport avec l'intensité du trafic.

Enfin fut résolu le problème du « multiplex » par lequel plusieurs télégrammes peuvent être transmis en même temps sur des longueurs d'onde différentes en évitant les réactions mutuelles, magnétiques ou électriques de ces différentes émissions (Brevets 519.575, 532.432, 536.739).

Ainsi la même station comportant une seule antenne, pouvait, suivant les besoins de l'exploitation, travailler soit comme une station unique de puissance égale à celle des alternateurs qui y étaient installés, soit comme autant de stations différentes qu'elle possédait d'alternateurs.

L'alternateur de haute fréquence S. F. R. fut, du point de vue technique, une éclatante réussite. Les alternateurs de Sainte-Assise, après vingt-cinq ans de service, fonctionnaient avec la même régularité qu'au premier jour quand, en 1944, ils furent mis hors de service par les Allemands contraints de quitter la France.

Le succès ne fut pas moindre du point de vue du prestige de la France en matière radioélectrique. L'alternateur de haute fréquence S. F. R. a été la pièce maîtresse du matériel radioélectrique français qui, après la guerre de 1914-1918, a fait le tour du monde et a donné à notre pays une place enviable dans la compétition radioélectrique internationale. Ils furent à Croix-d'Hins, La Doua, Sainte-Assise (avec ses 8 alternateurs) en France, Bamako, Hanoï, Saïgon, Tananarive, dans nos colonies, Ruysselde (Belgique), Coltano et Milan (Italie), Bucarest (Roumanie), Podebrady (Tchécoslovaquie), Istamboul et Ankara (Turquie), Belgrade (Yougoslavie), Rio-de-Janeiro (Brésil), Yunnan-Fou (Chine), Funoboshi (Japon). Avec eux, la radiotélégraphie française a pris pied sur tous les continents.

Parallèlement aux alternateurs à haute fréquence, le fonctionnement des multiplicateurs statiques de fréquence a retenu l'attention de Joseph Bethenod. Dans des conférences faites à l'Ecole Supérieure d'Electricité (49), on trouve une étude analytique du fonctionnement en charge de ces appareils, basés sur la saturation du noyau magnétique.

V. — LA LAMPE ELECTRONIQUE

Dans le domaine des lampes à trois électrodes, il est nécessaire de citer une importante étude intitulée *Sur l'emploi des audions comme générateurs auto-excitateurs* (15), 1916, dans laquelle se trouve exposée pour la première fois la théorie des triodes employées comme générateurs d'ondes entretenues, compte tenu du débit de la grille, étude qui a été le point de départ de très nombreuses publications.

La théorie de l'auto-entretien des oscillations a d'ailleurs, à plusieurs reprises, retenu l'attention de Joseph Bethenod : témoins trois articles *Sur les courbes caractéristiques et les conditions de stabilité des régimes* (14), 1916, 1917, 1918, dans lesquels, après la généralisation de la condition de stabilité de Kaufmann, sont successivement étudiés divers exemples d'application :

— L'amorçage de l'arc chantant ;

— La stabilité du groupe moteur-shunt à courant continu et alternateur à haute fréquence débitant sur antenne, avec un appendice sur la notion de coefficient de stabilité ;

— L'amorçage du dynatron.

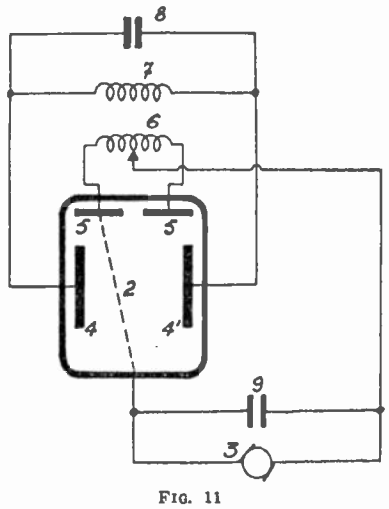


FIG. 11

Dans le même domaine, signalons un intéressant brevet n° 502.519 (5 novembre 1915) sur la production d'ondes entretenues au moyen d'une lampe analogue à ce que sera plus tard la lampe à faisceau qui contient, dans le vide, une cathode 2, deux électrodes de commande 4, 4′ et deux anodes, 5, 5′ portées au même potentiel par une source à force électromotrice constante 3 (fig. 11).

Supposons d'abord le champ électrique entre les plaques 4 et 4′ de sens tel qu'il dirige le faisceau électronique sur l'électrode 5, comme l'indique le trait en pointillé. Il s'ensuit un accroissement de courant dans l'enroulement compris entre l'anode 5 et le milieu du transformateur 6, d'où dans le secondaire 7 une force électromotrice qui, appliquée aux plaques 4, 4′, inverse le champ électrique dans l'espace qui les sépare. Le faisceau électronique est alors projeté sur l'électrode 5′ et ainsi de suite.

Le faisceau électronique prend ainsi un mouvement d'oscillation très rapide, dont la fréquence est

réglée par le circuit résonnant formé par la self-inductance 7 et le condensateur 8, et l'on obtient dans ce circuit des oscillations qui peuvent être transmises à un dispositif d'utilisation.

D'autres brevets concernent la construction des lampes. Indiquons, dans le lot (brevet 563.587, 16 juin 1922), une intéressante application de la haute fréquence au chauffage des cathodes des lampes à

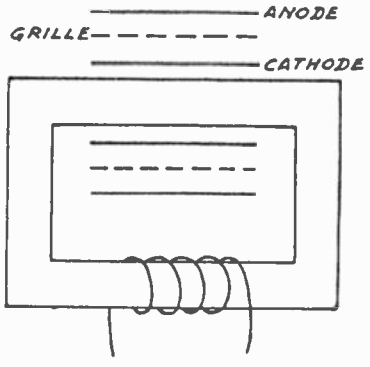


FIG. 12

grande puissance. La cathode est un tube de cuivre. A l'intérieur passe un circuit magnétique en tôle divisée excité par un enroulement parcouru par du courant de haute fréquence. La grille et la plaque sont de forme cylindrique et entourent la cathode (fig. 12).

VI. — ÉTUDES DIVERSES

Relevons, suivant le brevet 480.273 (1er décembre 1914), un transformateur de courant qui a été réalisé en de nombreux exemplaires pour la mesure des courants de haute fréquence de grande intensité. L'appareil est constitué par un enroulement torique dont les extrémités sont réunies à un milliampéremètre thermique. A l'intérieur du tore passe un conducteur parcouru par le courant à mesurer (fig. 12).

Si R est la résistance de l'enroulement, L sa self-inductance, M la mutuelle inductance du circuit du tore et du circuit parcouru par le courant I_1 à mesurer, l'équation différentielle du courant s'écrit

$$L\frac{d\,I_2}{dt} + R\,I_2 + M\frac{d\,I_1}{dt} = 0$$

ou, en notation imaginaire

$$(j\,L\,\omega + R)\,I_2 + j\,M\,\omega\,I_1 = 0$$

d'où, en représentant maintenant par I_1 et I_2 les intensités efficaces

$$I_1 = \frac{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}{M\omega}\,I_2$$

Mais le système constitue un transformateur parfait puisqu'un tore régulièrement enroulé est une bobine sans fuites. On en déduit :

$$L = n\,M$$

n étant le nombre de tours et par conséquent :

$$I_1 = n\sqrt{1 + \frac{R^2}{L^2\omega^2}}\,I_2$$

Si R est petit par rapport à Lω on a simplement

$$I_1 = n\,I_2$$

et le courant se trouve réduit dans la proportion du nombre de tours de l'enroulement torique et peut être mesuré au moyen d'un appareil du type courant, par exemple un appareil thermique.

On remarquera que, contrairement à ce qui se passe ordinairement, l'erreur commise sur la mesure est d'autant plus faible que la fréquence est plus élevée.

Signalons enfin, les articles suivants parmi d'autres publications dont on trouvera la liste à la fin de cette notice :

Théorie de la réception sur antenne horizontale de grande longueur (8), 1923, dans laquelle l'auteur analyse complètement le fonctionnement de l'antenne Beverage ;

Sur le dimensionnement des filtres usités en radiotechnique (24), 1921, étude de la spécification des bobines à réactance utilisées pour limiter le courant alternatif dans un circuit parcouru également par un courant continu donné ;

Sur le dimensionnement des shunts résonnants et des filtres à condensateurs usités en radiotechnique (38), 1927 ;

Sur une application du générateur polyphasé de M. Mesny (34), 1925, décrivant un système d'aériens orthogonaux alimentés au moyen de courants déphasés. Suivant la valeur du déphasage, on obtient une émission dirigée ou non ;

Calcul du champ produit à grande distance par un courant de haute fréquence circulant dans un conducteur rectiligne de longueur quelconque (33), 1924, cal-

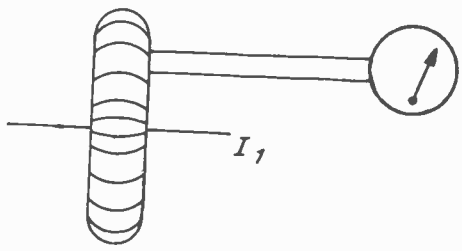


FIG. 13

cul s'appliquant aux antennes vibrant sur harmoniques et effectné au moyen de la représentation symbolique des courants alternatifs, qui peut être utilisé dans des cas trés divers ;

Etude d'un circuit oscillant soumis à l'action de deux forces électromotrices harmoniques (36), 1925, intéressant pour la théorie de l'hétérodyne. Le calcul est fait au moyen d'une construction graphique très simple, qui permet de suivre simultanément les variations des deux courants, et de calculer en particulier le maximum du produit des amplitudes.

Après 1925, on ne trouve plus beaucoup, dans les publications de Bethenod, d'études consacrées à la technique des radiocommunications. D'autres domaines, l'électrotechnique et l'automobile occupèrent, pendant une quinzaine d'années, la plus grande part de son activité. Quand la guerre vint, en 1939, il fut de ceux qui comprirent quelle pouvait être l'importance militaire de la recherche scientifique, et revint à la radioélectricité. Nous signalons en particulier

deux brevets non encore publiés, déposés au nom de la Société Française Radioélectrique (en collaboration avec M. Henri Chireix) et décrivant un système original de détection électromagnétique sur ondes de l'ordre du mètre, avec élimination de l'effet de la réflexion des ondes sur le sol.

J'ai cité quelques brevets. Il faudrait en ajouter bien d'autres. Il n'est aucun domaine de la haute et de la basse fréquence auquel Bethenod n'ait apporté sa contribution. Nous avons, sur les haut-parleurs, plusieurs brevets intéressants dont l'un contient, avant l'article classique de l'américain Blake sur la question, l'application de la contre-réaction. Il y en a d'autres sur les commandes à distance, la transmission des signaux sur les lignes d'énergie, le phonographe, le récepteur téléphonique. Citons, pour terminer, le brevet 564.063 sur l'application de la T. S. F. au théâtre. L'acteur se déplace sur un tapis métallique et sous un plafond ou un dais également métallique, qui constituent les armatures d'un condensateur relié à une source de haute fréquence. Dans cet espace règne un champ électromagnétique de haute fréquence dont on peut tirer les effets les plus spectaculaires : excitation d'ampoules portées par l'acteur et produisant des lumières diversement colorées, effluves lumineuses sortant de motifs métalliques fixés sur ses habits, aigrettes prolongeant ses doigts, supposés munis d'ongles métalliques.

VII. — BIOGRAPHIES ET HISTOIRE DE LA RADIOÉLECTRICITÉ

Lui-même pionnier de la T. S. F., Bethenod aimait à se reporter aux premières années de la Radioélectricité et à faire rendre à chacun ce qui lui était dû.

Dans une courte étude intitulée *les origines de la T. S. F.* (30), 1923, il réclame en faveur de Tesla la gloire d'avoir été le véritable inventeur de la T.S.F. Il rappelle qu'avant 1893, cet illustre ingénieur avait introduit l'antenne, la prise de terre, la nécessité du réglage à la résonance à la réception avec des self-inductances et des condensateurs, qu'il avait compris l'intérêt des ondes entretenues et construit des alternateurs à haute fréquence dès 1887. Une nouvelle étude d'ensemble, embrassant tous les aspects de la féconde carrière et des inventions de Nikola Tesla, fut écrite par Bethenod en 1938 (44).

Une autre figure à laquelle Bethenod saisissait toutes les occasions de faire rendre un juste hommage d'admiration était celle de son ancien maître André Blondel. Pour nous borner au domaine de la radioélectricité, celui-ci était pour lui le théoricien qui, dès 1898, avait donné l'explication définitive du rayonnement des antennes, l'inventeur qui avait découvert en 1898-1900 la télégraphie sans fil à étincelles musicales et la résonance acoustique, puis, en 1902, le cadre radiogoniométrique. Il était le puissant animateur qui savait découvrir les vocations et enflammer les autres de la même passion scientifique dont il donnait un si magnifique exemple quand, alité durant des années, il accumulait, dans les domaines les plus divers, les inventions et les recherches. A sa mort, en 1938, Bethenod lui rendit un magnifique hommage (46).

Dans l'article intitulé *Sur les machines à haute fréquence, leur théorie et leurs applications* (11), 1914, on trouve une intéressante revue de l'histoire des alternateurs à haute fréquence.

Un autre article : *Dix ans de T. S. F.*, écrit à l'occasion de la célébration du dixième anniversaire de notre Société retraçait l'historique des postes à étincelles, des arcs, des alternateurs.

Signalons enfin une courte biographie sur Paul Jégou (16), inventeur mort jeune, en 1918, dont quelques-uns d'entre nous se souviennent comme d'un de ces chercheurs ardents que la T. S. F. d'alors avait suscités et qui la servirent d'un culte exclusif. Bethenod avait, en lui, reconnu le démon qui le possédait lui-même.

Telle a été l'œuvre radioélectrique de Joseph Bethenod. On ne peut, l'ayant parcourue, se défendre d'un sentiment de mélancolie en pensant au destin des inventeurs, dépensant allègrement les ressources d'un magnifique talent pour des trouvailles que les découvertes de leurs successeurs ensevelliront d'autant plus vite que le progrès aura été plus rapide. Cette tristesse était parfois celle de Bethenod, quand il songeait aux travaux de sa jeunesse, aux postes à étincelles à tout jamais oubliés des jeunes générations, aux splendides alternateurs si tôt relégués par les ondes courtes et les lampes au rang d'accessoires démodés. Mais il ne s'attardait pas à ses mélancoliques souvenirs et l'éternelle jeunesse de l'imagination créatrice l'anima jusqu'au dernier jour.

Et d'ailleurs, Bethenod n'était pas tout entier dans ses recherches théoriques ou ses inventions. L'un des premiers et des plus illustres techniciens de la T. S. F., il fut lui aussi, toute sa vie, un conseil et un animateur. Quand il n'inventait pas lui-même, il mettait à la disposition des autres les dons qu'il possédait, son imagination, son savoir étendu à tous les domaines de l'art de l'ingénieur, sa prescience de ce qui était possible et de ce qui ne l'était pas, qui l'a toujours préservé des entreprises hasardeuses pour lui faire saisir le concret et l'utile, et plus que tout, son inépuisable bonté et son désintéressement. Il restera par là dans la mémoire de tous ses amis.

PUBLICATIONS DE J. BETHENOD

dans le domaine de la Radioélectricité.

1. **Sur le transformateur à résonance.** — *L'Eclairage Electrique*, 26 octobre 1907, p. 115 ; 2 novembre 1907, p. 145 ; 16 novembre 1907, p. 217 ; 30 novembre 1907, p. 289 ; 14 décembre 1907, p. 377 ; 28 décembre 1907, p. 454, vol. III.
2. **Sur le calcul de la fréquence propre d'une antenne excitée indirectement en dérivation.** — *La Lumière Electrique*, 30 janvier 1909, t. v, 2e série, p. 135.
3. **Ueber die scheinbaren ohmschen Widerstand von duennen Metallplatten fuer Wechselstrom.** — *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, 1909, t. II, p. 397.
4. **Ueber den Empfang elektromagnetischer Wellen in der Rrdiotelegraphie.** — *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, 1909, t. II, p. 603 et 1910, t. III, p. 302.
5. **Sur le calcul de l'amortissement d'une antenne excitée indirectement en dérivation.** — *La Lumière Electrique*, 2 octobre 1909, t. III, 2e série, p. 15.

6. **Remarque sur la formule de Bjerknes et son application à la détermination de l'amortissement des circuits oscillants.** — *La Lumière Electrique*, 4 décembre 1909, t. VIII, 2e série, p. 301.
7. **Sur l'alternateur à résonance.** — *La Lumière Electrique*, 25 décembre 1909, t. VIII, 2e série, p. 395.
8. **Vergleich zwischen induktiver und direkter Schaltung bei radiotelegraphischen Stationen.** — *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, 1910, t. III, p. 297.
9. **Sur l'emploi du circuit intermédiaire de Stone en radiotélégraphie et en radiotéléphonie.** — *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 2 mars 1910, t. X, 2e série, p. 135.
10. **Ueber den guenstigsten Wert des nuetzwiderstandes eines Resonators.** — *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, 1913, t. VI, p. 436.
11. **Sur les machines à haute fréquence. Leur théorie et leurs applications.** — *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 3 juin 1914, t. IV, 3e série, p. 557.
12. **Sur le réglage des postes radiotélégraphiques à ondes entretenues produites par les machines à haute fréquence.** — *La Lumière Electrique*, 2 octobre 1915, t. XXXI, 2e série, p. 1. — *Revue Générale de l'Electricité*, 25 août 1917, t. II, p. 285.
13. **Sur le calcul des pertes dans les tôles de fer aux fréquences élevées.** — *La Lumière Electrique*, 22 juillet 1916, t. XXXIV, 2e série, p. 73.
14. **Sur les courbes caractéristiques et les conditions de stabilité des régimes.** — *La Lumière Electrique*, 14 octobre 1916, t. XXXV, 2e série, p. 25. — *Revue Générale de l'Electricité*, 30 juin 1917, t. I, p. 1.003 ; 13 juillet 1918, t. IV, p. 35.
15. **Sur l'emploi des audions comme générateurs auto-excitateurs.** — *La Lumière Electrique*, 16 décembre 1916, t. XXXV, 2e série, p. 224.
16. **Nécrologie : Paul Jégou.** — *Revue Générale de l'Electricité*, 9 février 1918, t. III, p. 201.
17. **Sur la théorie de l'excitation par choc d'un circuit oscillant.** — *Revue Générale de l'Electricité*, 6 avril 1918, t. III, p. 449; Erratum, 11 mai 1918, t. III, p. 712.
18. **On the use of constant potentiel generators for charging radiotelegraphic condensers and the new radiotelephonic installations of the postal and telegraph department of France.** — *Proceedings of the Institute of Radioengineers*, juin 1918, t. VI, p. 159.
19. **Sur les machines à haute fréquence et leur réglage.** — *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, mars 1919, t. IX, 3e série, p. 161.
20. **On the theory of radiotelegraphic and radiotelephonic receiver circuits.** — *Proceedings of the Institute of Radioengineers*, octobre 1919, t. VII, p. 517.
21. **Sur les lignes artificielles.** — *Radioélectricité*, août 1920, vol. 1, p. 128.
22. **Sur l'autoexcitation des alternateurs au moyen de capacités.** — *Radioélectricité*, septembre 1920, t. I, p. 187.
23. **A propos de l'influence de la hauteur des pylônes sur la portée des postes radiotélégraphiques.** — *Radioélectricité*, novembre 1920, t. I, p. 285.
24. **Sur le dimensionnement des filtres utilisés en radiotechnique.** — *Radioélectricité*, juin 1921, t. I, p. 629 et juillet 1921, t. II, p. 11.
25. **Sur la théorie des systèmes récepteurs différentiels.** — *Radioélectricité*, février 1922, t. III, p. 55.
26. **Sur l'application des contrepoids aux postes radiotélégraphiques de terre.** — *L'Onde Electrique*, février 1922, t. I, p. 90.
27. **Sur l'équation des télégraphistes appliquée à l'étude des courants sinusoïdaux.** — *Radioélectricité*, octobre 1922, t. II, p. 424.
28. **Théorie de la réception sur antenne horizontale de grande longueur.** — *Radioélectricité*, janvier 1923, t. IV, p. 30 et mai 1923, t. IV, p. 171.
29. **Distortion free telephone receivers.** — *Proceedings of the Institute of Radioengineers*, avril 1923, t. II, p. 163.
30. **Les origines de la T. S. F.** — *Radioélectricité*, 1er septembre 1923, t. IV, p. 334.
31. **Théorie de la réception sur antenne apériodique.** — *L'Onde Electrique*, novembre 1923, t. II, p. 617.
32. **Sur la théorie du récepteur téléphonique.** — *Radioélectricité, Bulletin Technique*, 10 juin 1924.
33. **Calcul du champ produit à grande distance par un courant à haute fréquence circulant dans un conducteur rectiligne de longueur quelconque.** — *Revue Générale de l'Electricité*, 20 septembre 1924, t. XVI, p. 451.
34. **Sur une application du générateur polyphasé de M. Mesny.** — *L'Onde Electrique*, juin 1925, t. IV p. 239 et septembre 1925, t. IV, p. 396.
35. **Sur les condensateurs à variation linéaire.** — *L'Antenne*, 4 août 1925.
36. **Etude d'un circuit oscillant soumis à l'action de deux forces électromotrices harmoniques.** — *L'Onde Electrique*, septembre 1925, t. IV, p. 394.
37. **La modulation en téléphonie sans fil.** — *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, octobre 1925, t. V, 4e série, p. 1.153.
38. **Sur le dimensionnement des shunts résonnants et des filtres à condensateurs usités en radiotechnique.** — *Bulletin de la Société Française Radio, Electrique*, juillet 1927, p. 3.
39. **Sur une nouvelle méthode d'amplification des courants alternatifs à haute fréquence.** — *L'Onde Electrique*, juin 1928, t. VII, p. 261.
40. **Note sur les fours à induction à haute fréquence alimentés par des alternateurs.** — *L'Industrie Electrique*, 25 mars 1931.
41. **Dix années de T. S. F.** — *L'Onde Electrique*, novembre et décembre 1932, t. XI, p. 405.
42. **Les transmissions par courants porteurs sur les lignes à haute tension.** — *L'Onde Electrique*, novembre 1933, t. XII, p. 539.
43. **Etude de la décharge d'un condensateur à travers un tube à gaz.** — Compte rendu des séances de l'Académie des Sciences, 26 décembre 1937.
44. **Nikola Tesla.** — *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, juin 1938, t. VIII, 5e série, p. 485.
45. **Historique de l'industrie radioélectrique.** — Conférence donnée à la Semaine Internationale contre le cancer, le 25 novembre 1938, *Revue Générale de l'Electricité*, 28 janvier 1939, t. XLV, p. 99.
46. **André Blondel.** — *Revue Générale de l'Electricité*, 17 décembre 1938, t. XLIV, p. 751.
47. **Sur la variation du courant d'espace dans un magnétron sous l'action du champ magnétique.** — Compte rendu de l'Académie des Sciences, 4 décembre 1939, vol. 209, p. 832.
48. **Sur le tube électronique à modulation de vitesse.** — Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 15 janvier 1940, vol. 210, p. 103.
49. **Les alternateurs à haute fréquence.** (Préface de A. Blondel.) — Etienne Chiron, Editeur, 1925.
50. **Les générateurs à arc,** Editions de l'Ecole Supérieure d'Electricité, Section de Radioélectricité, 1934.
51. **Multiplicateurs statiques de fréquence,** Editions de l'Ecole Supérieure d'Electricité, Section de Radioélectricité 1935.

NIKOLA TESLA (1856-1943) [1]

PAR

F. BEDEAU

Ancien président de la Société des Radioélectriciens

L'*Onde Electrique* ayant été dans l'impossibilité de paraître pendant l'occupation, la Société des Radioélectriciens n'a pu rendre un hommage mérité à la mémoire de l'un des plus grands pionniers de la T. S. F., l'illustre inventeur yougoslave Nikola Tesla, mort le 7 janvier 1943.

L'œuvre de Tesla est si considérable qu'il est impossible non seulement de la résumer ici, mais même de donner une liste de ses innombrables inventions, Tesla a pris plus de 700 brevets !

On peut dire cependant que les travaux de Tesla se rattachent à deux groupes de phénomènes : production et réalisation pratique des champs tournants d'une part, obtention de courants de haute fréquence d'autre part.

C'est, en 1883, à Strasbourg que Tesla construisit ses premiers modèles de moteur à champ tournant; en 1887, la « Tesla Electric Company » réalisa des machines polyphasées à grand rendement. D'innombrables discussions ont eu lieu au sujet de la priorité de l'invention du champ tournant. Je me contenterai de reproduire ce que disait à ce sujet M. E. Darmois dans une conférence faite à la Sorbonne le 7 juillet 1936 :

« Ferraris eut à peu près en même temps que Tesla l'idée de la production des champs tournants, mais Tesla alla plus loin. Outre sa démonstration théorique, il construisit une machine qui marchait effectivement, répondant pleinement aux résultats désirés, alors que Ferraris ne réalisa pas de machine et même démontra que celles qu'on pourrait construire auraient un mauvais rendement ».

Vers 1889 Tesla s'attaqua au problème de la haute fréquence et réalisa des alternateurs produisant des courants de fréquence 30.000 cycles par seconde. Il se rendit compte que l'on ne peut guère aller plus loin dans cette voie et imagina alors le fameux transformateur qui porte son nom. Le primaire est constitué par un circuit oscillant pourvu d'un éclateur, lorsque la tension aux bornes de cet éclateur est suffisante, on obtient une étincelle oscillante dont la fréquence atteint aisément des valeurs de l'ordre 10^5 et 10^6 cycles par seconde; si le secondaire comporte un grand nombre de tours de fil la tension aux bornes de ce secondaire se chiffre par centaines de milliers de volts, des aigrettes richement ramifiées se produisent, des tubes à gaz non munis d'électrode s'illuminent... Les expériences de Tesla furent reproduites dans le monde entier et on sait l'application qu'en fit d'Arsonval à la radiothérapie.

Ce sont ces mêmes oscillateurs Tesla qui ont servi de modèle lors des premiers essais de radiotélégraphie, et les propriétés de ces oscillateurs sont trop classiques pour que j'y revienne ici. Alors qu'avec l'oscillateur de Hertz on ne pouvait obtenir qu'une puissance extrêmement faible, le dispositif de Tesla permettait l'obtention pratique d'ondes hertziennes. Signalons enfin que Tesla réalisa les premiers dispositifs de télécommande.

(1) Classification décimale n° 011.

LISTE DES NOUVEAUX MEMBRES (Suite)

MM.	Présentés par MM.
CHAUMONT (Robert), Etudiant	PONTE.
CHICON (Jean), Radioélectricien	Mme BOURGEAUX.
CHOUVION (André), Etudiant Radio E. S. E.	RIGAL.
CLOT (Georges), Ingénieur à la Société Française Radioélectrique	DE CHEVOISIER.
COHEN (Max), Etudiant	QUINET.
COMBELLES (Jacques)	RIGAL.
COMBES (Guy), Etudiant à l'Ecole de Radioélectricité de Bordeaux	CAU.
CORDEAU (Robert), Radio	QUINET.
CORPUS (Jacques), Ingénieur	MOUSSU.
CORTHONDO (Jean), Etudiant à l'Ecole de Radioélectricité de Bordeaux	CAU.
COSSE (Claude), Elève à l'Ecole Supérieure d'Electricité	NOEL.
DARFEUILLE (André), Assistant technique principal	MERCIER.
DELALANIE (André), Sous-Ingénieur	QUINET.
DELBORD (Yves-Marie), Etudiant E. S. E.	NOEL.
DERLOT (Emile), Officier de marine, professeur à la C. E. P. T. R. A. à Mers-el-Kébir	PUTZ.
DESPLAS (Henri), Elève à l'E. S. E.	RIGAL.
DOIZELET, Etudiant radio (E. C. de T. S. F)	QUINET.
DONZEAU (Michel), Etudiant à l'école de Radioélectricité de Bordeaux	CAU.
DREYFUS (François), Chef régional du service des Transm. de l'Int. (S.-et-Oise et Seine-et-Marne).	Mme BOURGEAUX.
DUJARDIN (Evrard), Radioélectricien	Mme BOURGEAUX.
DUPUIS (Lucien), Etudiant	RIGAL.
DURAND (Paul), Ingén. E.S.E., Ing. au C.N.E.T.	POINCELOT.
DUTILH (Jean), Ingénieur au C. N. E. T.	LOEB.
EMERY (Jean), Ingénieur des Travaux, Service des Transmissions de l'Intérieur	Mme BOURGEAUX.
ESCULIER (Guy), Ingénieur, ancien élève de l'Ecole Polytechnique	GROLLEAU.
FASSIN (Jean), Ingénieur	Mme BOURGEAUX.
FAUCHER (Valère), Constructeur Radio	CHAUVIERRE.
FOUQUIER (André), Ingénieur	H. GUTTON.
FOURCADE (Marc), E. S. E. Radio, Ingénieur I.E.T.	PONTE.
FOURNIER (Charles), Ingénieur Radioélectricien au L. C. T.	CABESSA.
FUCHS, Agent spécial S. T. I.	Mme BOURGEAUX.
GANDY (André), Ingénieur E. P. I. C.	LANGEVIN.
GAUTHIER (René), Ingénieur	Mme BOUGEAUX.
GAUVENET (André), Ingénieur	BOULC'H.
GENESTE (Daniel), Etudiant Radio	QUINET.
GLEITZ (Jean), Etudiant E. S. E.	PONTE.
GOUILLOU (Roger), Etudiant Radio E. S. E.	RIGAL.
GOUSSOT (Louis), Ingénieur à la Radiodiffusion Française	LACHARNAY.
GOUZY (Jean), Radio opérateur	Mme BOURGEAUX.
GRAND (Edouard), Licencié ès sciences, Ingénieur aux C. R. C., à Saint-Etienne	ACHENBRENNER.
GRATIEUX (Edouard), Etudiant E. R. B.	CAU.
GRIT (René), Etudiant	PONTE
GUIBERT (Alexandre), Ingénieur Radio E.S.E. aux Ets Pathé-Cinéma, Professeur à l'E. N. S. T.	RIGAL.
GUISSET (Eugène), Capitaine des Transmissions	RIGAL.
GUYOT (Lucien), Ingénieur E. P. C. I., étudiant à la Faculté des Sciences de Paris	PÉRILHOU.
HARDERS (Maurice), Agent technique	GLAZER.
HEITZMANN (Lucien), Officier d'aviation	RIGAL.
HENNEBICQUE (Jean), Elève de l'Ec. Polytechnique.	RIGAL.
HENRY (Michel), Officier de marine	BAUDE.
HERNET (Jean), Ingénieur E. S. E.	MATHIEU.
HUCHERT (Robert), Etudiant E. S. E. (Radio)	M. NOEL.
HUMBLOT (Pierre), Offic. d'active (élève à l'E.S.E.)	
Mlle	CHOLEWSKY.
JANET (Nicole), Ingénieur E. S. E.	GUÉNARD.
MM.	
JAVION (Gilbert), Etudiant à l'Ecole Centrale de T. S. F.	QUINET.
JOUANNIC (Jean), Ingénieur civil des Mines, Ingénieur au Laboratoire Sadir Carpentier	RIGAL.
JULIEN-BINARD (Louis), Officier de marine, professeur à la C. E. P. T. R. A., à Mers-el-Kébir	PUTZ.
KLINOVITSKY (Jean), Etudiant, élève de l'E. S. E.	RIGAL.
KNOBLOCH (Jean), Ingénieur E. S. E. (Sadir-Carpentier)	TASSY.
LABORATOIRE CENTRAL DE L'ARTILLERIE NAVALE	ROCARD.
LABORDERIE (Jean), Agent technique	BERNIFR.
LABOURDETTE (André), Radioélectricien	RIGAL.
LAFAY (Charles), Officier d'active	FLORIOT.
LANGLADE (Louis), Chef rég. au service des Transmissions de l'Intérieur, à Poitiers	Mme BOURGEAUX.
LAURENT (René), Ingénieur électricien E. E. M. I.	BEDEAU.
LEBLOND (Maurice), Contrôleur Radiodiffusion Française	RIGAL.
LE DERFF (Julien), Etudiant E. R. B.	CAU.
LEGROS (Robert), Capitaine d'aviation	POINCELOT.
LELOUTRE (Arthur), Chef d'atelier montage radio.	ZAKHARÉVITCH.
LESENS (Jean), Opérat. Radiotélégraphiste S.T.I.	Mme BOURGEAUX.
LIOT (Raymond), Ingénieur	BERNIER.
MAITRE (Guy), Sous-ingénieur radioélectricien	QUINET.
MANDON (Marcel), Radioélectricien	QUINET.
MASLIAH (Léon), Etudiant	RIGAL.
MEILLAUD (Raphaël), Radiotechnicien et étudiant à l'E. C. de T. S. F.	QUINET.

MM.	Présentés par MM.
MELQUIOND (Pierre), Etudiant E. E. M. I.	RIGAL.
MOISSON L., Radioélectricien	BÉDOURA.
MONTILLAUD (Francis), Etudiant E. R. B.	CAU.
MOSCHETTI (Dominique), Ingénieur des Travaux des P. T. T.	LAPRIE.
MOSTORETCH (Nicolas), Stagiaire de recherches au C. N. R. S.	EPELBOIM.
PAIRE (Maurice), Etudiant E. E. M. I.	DAVID.
PAMLARD (Paul), Opérateur Radio	Mme BOURGEAUX.
PATERNAULT (Léopold), Etudiant Radio E. S. E.	PONTE.
PATRIARCHE (Pierre), Ingénieur	THIBIEROZ.
PELLE (Pierre), Ingénieur en chef des P. T. T. au service des recherches	LE CALVEZ.
PERRIOD (Francis), Agent technique radio	DROIN.
PIERRE (Marcel), Agent technique	GLAZER.
PIERRE (Michel), Agent technique S. F. R.	RIGAL.
PITOIS (Charles), Ingénieur E. B. P.	MÉTRON.
PRADIER (Henri), Agent technique de laboratoire 2e catégorie	PRON.
PRIEUR (Henri), Electricien	RIGAL.
REGARD (Charles), Etudiant Radio	QUINET.
REYNAUD (Eugène), Agent technique au Laboratoire R. H. de la T. H.	FEISSEL.
ROBERT (Guy), Radiotechnicien	RIGAL.
ROBIN (Alain), Elève à l'E. S. E.	EAMON.
ROBIN (Jean), Elève à l'E. S. E. (Radio)	PONTE.
ROPARS (Gaston), Ingénieur A. et M.	BADE.
ROUILLER (Jacques), Agent technique	PONTE.
SALAUN (Marcel), Agent technique	CAMERINI.
SCHERRER (Vadim), Ingénieur	GUTTON.
SENICOURT (Lucien), Ingénieur	GUTTON.
SIGNEYROLE (Raymond), Agent technique radio	MIRAT.
SIMON (Paul), Etudiant à l'E. C. de T. S. F.	QUINET.
SOCIÉTÉ D'APPLICATIONS RADIOÉLECTRIQUES A L'AÉRONAUTIQUE ET A LA MARINE	RIGAL.
SOUBIRON (Paul), Ingénieur Radio	Mme BOURGEAUX.
SOULIE (André), Elève Ingénieur	QUINET.
SOUVERAIN (Lucien), Agent spécial Radio	Mme BOURGEAUX.
SUART (Robert), Ingénieur Rarioélectricien	THIBIEROZ.
SURDIN (Maurice), Chef de Service Commissariat à l'Energie atomique	RIGAL.
TASSIN (André), Officier des Transmissions	RIGAL.
THIERY (Lucien), Ingénieur Radio à la Société Socradel	RIGAL.
VALENTIN (François), Agrégé de l'Université, attaché de recherches	CAU.
VAUCHY (Jean), Officier aviateur	BASSÉRAS.
VERMERSCH (Maurice), Ingénieur I.E.G., E.E.M.I., artisan radioélectricien	RIGAL.
VIALLE (Gilbert), Agent spécial Radio S. T. I.	Mme BOURGEAUX.
VIDAL (Roland), Etudiant E. R. B.	CAU.
VIDAL (Raymond), Ingénieur Radioélectricien	MERCIER.
VIGREUX (Jean), Chef de Poste Radio, Transmissions de l'Intérieur	Mme BOURGEAUX.
WAIN (Edmond), Employé aux P. T. T.	RIGAL.
WEILL (Roland), Etudiant Radio	QUINET.
WEISS (Emeric), Ingénieur, industriel	RIGAL.
WINTERMANTEL (Paul), Agent spécial Radio S.T.I.	Mme BOURGEAUX.
ALLAIS, Officier de carrière	DAUPHIN.
ARJAKOVSKY (Anatole), Etudiant Radio E. C. de T. S. F.	QUINET.
ARLE (Jean), Ingénieur à la Division « Télécommande » du C. N. E. T.	LOEB.
AVIGNON (Georges), Agent Technique de la Marine	BENOIT.
BARTHES (Emile), Elève Radio E. S. E.	Lt-Col. REVERIEUX.
BEAUGRAND (Jacques), Etudiant	BENOIT.
BEDOS (Roger), Ingénieur au C. N. E. T., D. E. M.	DAGUIER.
BELPOMME, Ingénieur A. M.	VIOLET.
BERRE (Marcel), Agent Technique de la Marine	BENOIT.
Mlles	
BERTHAUD (Madeleine), Etudiante I. P. G., section H. F.	BENOIT.
BORDES (Marcelle), Etudiante E. S. E.	RIGAL.
MM.	
BORDES (Jean), Etudiant à l'E. C. de T. S. F.	QUINET.
BREDILLARD (Roger), Ingénieur E. S. E.	CLOCHEZ.
BRETON (Maurice), Etudiant E. C. de T. S. F.	QUINET.
BRISSEAU (Jean), Technicien en Radio	PIERRE.
BROUSSAUD (Georges), Elève à l'E. S. E.	RIGAL.
CHAREYRE (Lucien), Etudiant à l'I. P. G., section H. F.	BENOIT.
Mlle	
CHEVILLON (P.), Etud. à l'I. P. G., section H. F.	BENOIT.
MM.	
COLOMBO (Serge)	Lt-Col. ANGOT.
COMOY (Michel), Elève de 1re année, radio à l'E. S. E.	BÉDOURA.
COMBRISSON (Jean), Ingénieur	DE MARE.
COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL TÉLÉPHONIQUE	RIGAL.
CORNET (Henri), Radiotélégraphiste (opérateur)	Mme BOURGEAUX.
DANTHEZ (Maurice), Etudiant à l'E. C. de T. S. F.	QUINET.
DAUX (René), Etudiant à l'I. P. G., section H. F.	BENOIT.
DESCHAMPS (Jacques), Ingénieur, ancien élève de l'Ecole Polytechnique	GÉHIN-CHIREIX.

Imprimerie André Tournon et Cie, Paris. — O. P. L. n° 31.0979. — *Le gérant :* Etienne CHIRON
Dépôt légal : 1e trimestre 1947 — I. n° 125. — E. n° 20.